



**Leandro da Silva  
Moreira**

**Tijolos perfurados com melhores características  
isolantes térmicas**





**Leandro da Silva  
Moreira**

**Tijolos perfurados com melhores características  
isolantes térmicas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Vítor António Ferreira da Costa, Professor Associado com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia**

professora auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor António Manuel Gameiro Lopes**

professor auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

**Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa**

professor associado com agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

À minha família e aos meus amigos, que fizeram com que fosse possível a realização deste trabalho e o culminar desta etapa na minha vida.

Agradeço ao meu orientador pelo apoio e disponibilidade demonstrados na realização deste trabalho.

Ao Eng. António Côrte-Real da Construcer, pelos dados facultados relativamente aos tijolos comum.





## **palavras-chave**

Tijolos cerâmicos perfurados, protuberâncias, isolamento térmico, número de Nusselt, simulação numérica, retorno de investimento.

## **resumo**

Esta dissertação teve como principal objetivo a simulação numérica dos processos de transferência de calor nos tijolos perfurados, e avaliar a performance de tijolos com geometrias de perfuração diferentes das formas usuais quadrangular ou retangular, em busca das geometrias de perfuração conducentes às melhores características de isolamento térmico dos tijolos perfurados.

O trabalho iniciou-se pela simulação numérica da transferência de calor ao nível de uma cavidade de tijolo individual, por forma a validar os resultados obtidos com os do modelo padrão. De seguida avaliou-se a performance térmica de uma cavidade individual de tijolo considerando uma protuberância e depois duas protuberâncias, e determinou-se qual seria a localização e o comprimento da protuberância que corresponde às melhores características de isolamento térmico. Uma única protuberância colocada sensivelmente a meio da cavidade corresponde à configuração com a melhor performance de isolamento térmico o que representa uma melhoria em termos de isolamento térmico de cerca de 12%.

A partir dos resultados obtidos ao nível de uma cavidade de tijolo individual, procuraram-se as configurações ótimas em termos de isolamento térmico no tijolo de 11 e no tijolo de 15. A protuberância ótima no tijolo de 11 corresponde a uma redução em termos de transferência de calor de 16% enquanto que no tijolo de 15 corresponde a 17%. Quanto maior a diferença de temperatura entre as faces exterior e interior do tijolo maior é a redução conseguida na transferência de calor.

O custo de aquisição do novo tijolo de 11 é 12,48 c€, 25% mais caro que o tijolo de 11 comum, e do novo tijolo de 15 é 17,6 c€, 26% mais caro que o tijolo de 15 comum. Foi feita uma análise custo/benefício para as três regiões em zonas climáticas distintas de Évora, Bragança e Leiria, obtendo-se tempos de retorno do investimento, nos novos tijolos de 15, de cerca de dez meses, seis meses e onze meses, respetivamente e para os novos tijolos de 11 de cinco meses, três meses e seis meses, respetivamente.



**keywords**

Holed clay bricks, protuberances, thermal insulation, Nusselt number, numerical simulation, payback.

**abstract**

The main objective of this thesis is the numerical simulation of heat transfer processes in holed bricks, and the evaluation of the thermal performance of holed bricks with cavities with geometries different from the usual square or rectangular shapes, searching for the geometries leading to better overall thermal insulation characteristics of the holed bricks.

This work began with the numerical simulation of the heat transfer in a single brick cavity, so as to validate the obtained results. Then it was evaluated the thermal performance of a single brick cavity considering firstly one protuberance and latter two protuberances, and it was determined the location and length of protuberance leading to the best thermal insulation characteristics of the enclosure. An only one protuberance placed in the middle of single brick cavity lead to an improvement in terms of thermal insulation close to 12%.

From the results obtained for a single brick cavity, searching was conducted the optimum protuberances for the optimum protuberances when considering the overall 11 cm and 15 cm bricks. The optimum protuberance for the 11 cm brick lead a reductions in of the overall heat transfer of 16% and the optimum protuberance for the 15 cm brick lead a 17%. The greater the temperature difference between outside and inside surfaces of the whole bricks the greater the reduction achieved in the heat transfer.

The cost of the new 11 cm brick is 12.48 c€, 25% more expensive than the standard 11 cm brick, and the cost of the new 15 cm brick is 17.6 c€, 26% more expensive than the standard 15 cm brick. A cost / benefit analysis was conducted for three regions, in distinct climatic zones, Évora, Bragança and Leiria, leading to payback periods for new 15 cm brick of about ten months, six months and eleven months, respectively and for new 11 cm brick is five months, three months and six months, respectively.



## Índice

Lista de figuras.....	iii
Lista de tabelas .....	v
Nomenclatura .....	vii
1 Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Motivação e abordagem .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.4 Estrutura da dissertação .....	3
2 Estado da arte .....	5
3 Simulação numérica da transferência de calor em tijolos perfurados .....	11
3.1 Caso de estudo 1 .....	11
3.1.1 Caso de estudo 1.1 .....	11
Geração da malha .....	12
Modelo físico-matemático .....	13
Condições e simplificações .....	13
Condições de fronteira .....	15
Modelo numérico .....	15
Convergência do processo iterativo .....	18
Resultados e validação do modelo .....	18
3.1.2 Caso de estudo 1.2 .....	20
3.1.3 Caso de estudo 1.3 .....	24
Resultados .....	24
3.2 Caso de estudo 2 .....	27
3.2.1 Caso de estudo 2.1 .....	27
Condições de fronteira .....	28
Resultados .....	28
3.2.2 Caso de estudo 2.2 .....	32
Condições de fronteira .....	32
Resultados .....	33
4 Análise custo/benefício .....	37

4.1	Poupanças energéticas potenciais dos novos tijolos .....	37
4.1.1	Caso prático.....	42
4.2	Custo dos novos tijolos.....	45
4.3	Retorno de investimento nos novos tijolos.....	46
5	Conclusões .....	51
Anexos .....		53
Anexo A - Evolução dos resíduos nas simulações numéricas. ....		53
Anexo B - Ganhos energéticos com os novos tijolos. ....		55
Bibliografia .....		59

## Lista de figuras

FIGURA 1.1 - MOVIMENTO DO FLUIDO NO INTERIOR DE UMA CAVIDADE RETANGULAR COM PAREDES VERTICAIS SUJEITAS A TEMPERATURAS DIFERENTES ( INCROPERA E DEWITT, 2006). .....	1
FIGURA 2.1 - DOMÍNIO CONSIDERADO NO TRABALHO DE LI <i>ET AL.</i> (LI <i>ET AL.</i> , 2008b).....	5
FIGURA 2.2 - DOMÍNIO CONSIDERADO NO TRABALHO (SUN <i>ET AL.</i> , 2009) .....	6
FIGURA 2.3 - REPRESENTAÇÃO DA SECÇÃO 2D DO TIJOLO-TIPO 1 (BOUKENDIL <i>ET AL.</i> , 2009).....	7
FIGURA 2.4 - TIJOLO TERMOARCILLA BRICK®29 ECO (MORALES <i>ET AL.</i> , 2011) .....	8
FIGURA 2.5 - TIJOLO PADRÃO E CONFIGURAÇÃO ÓTIMA, RESPETIVAMENTE (MORALES <i>ET AL.</i> , 2011) .....	8
FIGURA 2.6 - AS DIFERENTES GEOMETRIAS DE TIJOLOS PERFURADOS CONSIDERADOS PELO AUTOR (ARENDT <i>ET AL.</i> , 2011). .....	9
FIGURA 3.1 - VISTA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DA CAVIDADE INDIVIDUAL DE UM TIJOLO (DIMENSÕES EM MM).....	11
FIGURA 3.2 - MALHA CORRESPONDENTE À CAVIDADE DO TIJOLO E RESPETIVAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA. ....	12
FIGURA 3.3 - ILUSTRAÇÃO DA DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO INTEGRAL DE TRANSPORTE DE UM ESCALAR (ANSYS, 2010).....	16
FIGURA 3.4 - CAMPO DE TEMPERATURAS DA CAVIDADE INDIVIDUAL DE UM TIJOLO.....	19
FIGURA 3.5 - CAMPO DAS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES NA CAVIDADE INDIVIDUAL DE UM TIJOLO. ....	19
FIGURA 3.6 - VISTA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DA CAVIDADE DO TIJOLO COM UMA PROTUBERÂNCIA (DIMENSÕES EM MM). ....	20
FIGURA 3.7 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA LOCALIZAÇÃO E DO COMPRIMENTO DA PROTUBERÂNCIA.....	21
FIGURA 3.8 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA LOCALIZAÇÃO E DO COMPRIMENTO DA PROTUBERÂNCIA [X,L]=[18:22,24:36]. ....	22
FIGURA 3.9 - CAMPO DE TEMPERATURAS DA CAVIDADE DE UM TIJOLO COM UMA PROTUBERÂNCIA ÓTIMA. ....	23
FIGURA 3.10 - CAMPO DAS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES NA CAVIDADE DE TIJOLO COM UMA PROTUBERÂNCIA ÓTIMA.....	23
FIGURA 3.11 - VISTA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DA CAVIDADE DO TIJOLO COM DUAS PROTUBERÂNCIAS (DIMENSÕES EM MM). ..	24
FIGURA 3.12 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA LOCALIZAÇÃO E COMPRIMENTO DAS DUAS PROTUBERÂNCIAS. ....	25
FIGURA 3.13 - CAMPO DE TEMPERATURAS DA CAVIDADE DE UM TIJOLO COM DUAS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS. ....	26
FIGURA 3.14 - CAMPO DAS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES NA CAVIDADE COM DUAS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS. ....	26
FIGURA 3.15 - VISTA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM TIJOLO DE 11 COM PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS (DIMENSÕES EM MM).....	27
FIGURA 3.16 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA LOCALIZAÇÃO E DO COMPRIMENTO DAS PROTUBERÂNCIAS PARA O TIJOLO DE 11. ....	28
FIGURA 3.17 - CAMPO DE TEMPERATURAS PARA O TIJOLO DE 11 CONVENCIONAL, SEM PROTUBERÂNCIAS. ....	29
FIGURA 3.18 - CAMPO DE TEMPERATURAS PARA O TIJOLO DE 11 COM AS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS.....	30
FIGURA 3.19 - CAMPO DAS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES PARA O TIJOLO DE 11 CONVENCIONAL, SEM PROTUBERÂNCIAS.....	30
FIGURA 3.20 - CAMPO DAS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES PARA O TIJOLO DE 11 COM AS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS. ....	31
FIGURA 3.21 - VISTA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM TIJOLO DE 15 COM PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS (DIMENSÕES EM MM).....	32
FIGURA 3.22 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA LOCALIZAÇÃO E DO COMPRIMENTO DAS PROTUBERÂNCIAS PARA O TIJOLO DE 15. ....	33
FIGURA 3.23 - CAMPO DE TEMPERATURAS TIJOLO DE 15 CONVENCIONAL, SEM PROTUBERÂNCIAS. ....	34
FIGURA 3.24 - CAMPO DE TEMPERATURAS PARA O TIJOLO DE 15 COM AS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS.....	35
FIGURA 3.25 - CAMPO DAS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES PARA O TIJOLO DE 15 CONVENCIONAL, SEM PROTUBERÂNCIAS.....	35
FIGURA 3.26 - CAMPO DAS MAGNITUDES DAS VELOCIDADES PARA O TIJOLO DE 15 COM AS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS. ....	36
FIGURA 4.1 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE AS FACES DO TIJOLO DE 11, SEM PROTUBERÂNCIAS E COM AS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS. ....	37
FIGURA 4.2 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE AS FACES DO TIJOLO DE 15, SEM PROTUBERÂNCIAS E COM AS PROTUBERÂNCIAS ÓTIMAS. ....	38
FIGURA 4.3 - TIJOLO DE 15 E REBOCO, E RESPECTIVO CIRCUITO TÉRMICO EQUIVALENTE. ....	39
FIGURA 4.4 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE OS AMBIENTES EXTERIOR .....	41
FIGURA 4.5 - NÚMERO DE NUSSELT EM FUNÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE OS AMBIENTES EXTERIOR .....	41
FIGURA 4.6 - PORTUGAL CONTINENTAL. ZONEAMENTO CLIMÁTICO DE INVERNO (DL 80/2006). ....	42

FIGURA 4.7 - PORTUGAL CONTINENTAL. ZONEAMENTO CLIMÁTICO DE VERÃO (DL 80/2006). ....	42
FIGURA 4.8 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CUSTO/BENEFÍCIO DOS NOVOS TIJOLOS DE 15 PARA O CONCELHO DE ÉVORA. ....	47
FIGURA 4.9 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CUSTO/BENEFÍCIO DOS NOVOS TIJOLOS DE 15 PARA O CONCELHO DE BRAGANÇA. ....	47
FIGURA 4.10 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CUSTO/BENEFÍCIO DOS NOVOS TIJOLOS DE 15 PARA O CONCELHO DE LEIRIA. ....	48
FIGURA 4.11 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CUSTO/BENEFÍCIO DOS NOVOS TIJOLOS 11 PARA O CONCELHO DE ÉVORA. ....	48
FIGURA 4.12 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CUSTO/BENEFÍCIO DOS NOVOS TIJOLOS 11 PARA O CONCELHO DE BRAGANÇA. ....	49
FIGURA 4.13 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CUSTO/BENEFÍCIO DOS NOVOS TIJOLOS 11 PARA O CONCELHO DE LEIRIA. ....	49
FIGURA A.1 - EVOLUÇÃO DOS RESÍDUOS DA SIMULAÇÃO DE UMA CAVIDADE INDIVIDUAL DE UM TIJOLO.....	53
FIGURA A.2 - EVOLUÇÃO DOS RESÍDUOS DA SIMULAÇÃO DO TIJOLO DE 11 COM PROTUBERÂNCIAS.....	53
FIGURA A.3 - EVOLUÇÃO DOS RESÍDUOS DA SIMULAÇÃO DO TIJOLO DE 15 COM PROTUBERÂNCIAS.....	54



## Lista de tabelas

TABELA 2.1 - MATERIAIS TESTADOS NO ESTUDO REFERIDO (ARENDT <i>ET AL.</i> , 2011).....	10
TABELA 3.1 - PROPRIEDADES DO AR E DO BARRO VERMELHO UTILIZADOS NO FLUENT®. ....	13
TABELA 3.2 - POSIÇÃO ÓTIMA DA PROTUBERÂNCIA NOS DIFERENTES CASOS DE ESTUDO E REDUÇÃO CONSEGUIDA NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR GLOBAL. ....	36
TABELA 4.1 - DIFERENÇAS DE TEMPERATURA ENTRE OS AMBIENTES EXTERIOR E INTERIOR, E ENTRE AS FACES DOS TIJOLOS.....	43
TABELA 4.2 - CUSTOS ASSOCIADOS À ENERGIA CONSUMIDA NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO (INVERNO). ....	44
TABELA 4.3 - CUSTOS ASSOCIADOS À ENERGIA CONSUMIDA NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO (VERÃO). ....	44
TABELA 4.4 - CUSTOS ANUAIS ASSOCIADOS À ENERGIA CONSUMIDA (AMBAS AS ESTAÇÕES). ....	44
TABELA 4.5 - CUSTOS DE FABRICO ASSOCIADOS AOS NOVOS TIJOLOS, COM PROTUBERÂNCIAS.....	45
TABELA 4.6 - CUSTOS DE TRANSPORTE ASSOCIADOS AOS NOVOS TIJOLOS, COM PROTUBERÂNCIAS. ....	45
TABELA 4.7 - CUSTO POR METRO LINEAR DE UMA PAREDE SIMPLES DE ALVENARIA. ....	46
TABELA B.1 - VALORES DO CALOR TRANSFERIDO E DO NÚMERO DE NUSSELT PARA OS TIJOLOS COMUNS E PARA OS NOVOS TIJOLOS DE 11. ....	55
TABELA B.2 - VALORES DO CALOR TRANSFERIDO E DO NÚMERO DE NUSSELT PARA OS TIJOLOS COMUNS E PARA OS NOVOS TIJOLOS DE 15. ....	55
TABELA B.3 - POUPANÇAS ENERGÉTICAS PARA AS VÁRIAS DIFERENÇAS DE TEMPERATURA ....	56
TABELA B.4 - ENERGIA CONSUMIDA NA ESTAÇÃO DE AQUECIMENTO (INVERNO). ....	57
TABELA B.5 - ENERGIA CONSUMIDA NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO (VERÃO). ....	57
TABELA B.6 - TOTAL ANUAL DE ENERGIA CONSUMIDA (AMBAS AS ESTAÇÕES). ....	57



## Nomenclatura

### Símbolos:

$A, \vec{A}$	Área	$[m^2]$
$C$	Capacidade térmica mássica	$[J/(kg \cdot ^\circ C)]$
$g, \vec{g}$	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
$GD$	Graus-dia	$[^\circ C.dias]$
$H$	Altura da cavidade	$[m]$
$k$	Condutividade térmica	$[W/(m \cdot ^\circ C)]$
$L$	Comprimento da protuberância	$[m]$
$L$	Largura da cavidade	$[m]$
$N$	Número inteiro	
$Nu$	Número de Nusselt	
$p$	Pressão	$[Pa]$
$Pr$	Número de Prandtl	
$Q$	Quantidade de calor	$[kWh]$
$\dot{Q}$	Calor transferido	$[W]$
$\dot{Q}''$	Fluxo de calor	$[W/m^2]$
$\vec{r}$	Distância entre o centroíde e a face de célula	
$R$	Resistência térmica	$[^\circ C/W]$
$Ra$	Número de Rayleigh	
$S$	Termo de fonte	
$T$	Temperatura	$[^\circ C]$
$t$	Tempo	$[s]$
$u$	Componente da velocidade em x	$[m/s]$
$v$	Componente da velocidade em y	$[m/s]$
$\vec{v}$	Vetor velocidade	$[m/s]$
$V$	Volume de controlo	$[m^3]$
$X$	Localização da protuberância	$[m]$
$x, y$	Coordenadas cartesianas	$[m]$

**Símbolos gregos:**

$\mu$	Viscosidade	[kg/(m.s)]
$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\beta$	Coeficiente de expansão térmica	[1/K]
$\Delta$	Diferença ou distância	
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Massa volúmica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi$	Transporte de variável genérica dependente de um escalar	
$\Gamma$	Coeficiente de difusão genérico	

**Índices:**

0	Ambiente exterior
1	Face do reboco exterior
2	Face exterior do tijolo
3	Face interior do tijolo
4	Face do reboco interior
5	Ambiente interior
a	Ambiente exterior
ar	Ar
C	Superfície fria
c	Referência
f	Face da célula
f	Fluido
H	Superfície quente
i	Ambiente Interior
p	Pressão constante
rebext	Reboco exterior
rebint	Reboco interior
s	Superficial
se	Superficial exterior
si	Superficial interior
T11	Tijolo de 11
T15	Tijolo de 15

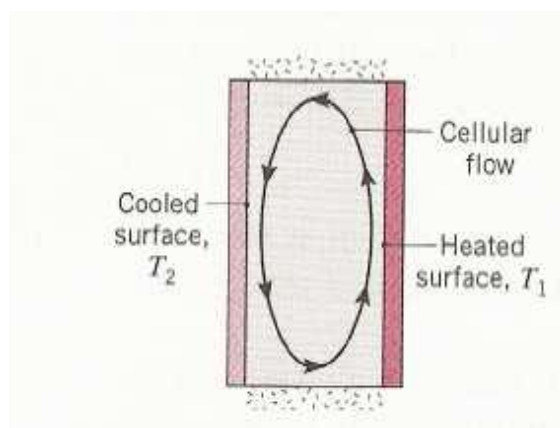
## 1 Introdução

### 1.1 Enquadramento

Atualmente, o setor dos edifícios em Portugal representa cerca de 30 % da energia total consumida (DGGE, 2012). Uma das vias mais promissoras para reduzir esse valor passa por melhorar as características isolantes das suas paredes, e mais concretamente dos elementos que as incorporam como é o caso dos tijolos cerâmicos perfurados. Tal redução ganha maior importância na medida em que diminui a dependência energética do país em relação aos combustíveis fósseis e, por conseguinte, em relação ao exterior, desta forma reduzindo também a emissão de gases de efeito de estufa, pois o seu aumento tem consequências nefastas para o planeta. Outros fatores a ter em conta são o preço da energia ter tendência a aumentar cada vez mais e os requisitos em termos regulamentares e de conforto serem também crescentes.

A transferência de calor no interior das cavidades dos tijolos perfurados ocorre por convecção natural, devido ao gradiente de temperatura do ar que preenche essas cavidades. O ar que está a temperaturas mais elevadas sobe, pois é menos denso, e o ar a temperaturas mais baixas desce por ação da gravidade.

O movimento do fluido é ascendente junto às superfícies quentes e descendente junto às superfícies frias. Este processo provoca a recirculação do fluido no interior de cada cavidade, como ilustrado na Figura 1.1 (Incropera e Dewitt, 2006).



**Figura 1.1 - Movimento do fluido no interior de uma cavidade retangular com paredes verticais sujeitas a temperaturas diferentes ( Incropera e Dewitt, 2006).**

A redução da transferência de calor através dos tijolos perfurados consegue-se inibindo as correntes de convecção natural no interior das suas cavidades.

## 1.2 Motivação e abordagem

Com este trabalho propõe-se a realização da simulação numérica dos processos de transferência de calor nos tijolos cerâmicos perfurados, para avaliar a performance térmica de tijolos com geometrias de perfuração diferentes da forma usual quadrangular ou retangular, em busca da geometria de perfuração que confere as melhores características de isolamento térmico aos tijolos perfurados.

O *software* escolhido para as simulações numéricas foi o FLUENT® da ANSYS®, pois é o mais adequado e utilizado em grande parte deste tipo de trabalhos como será visto mais à frente no capítulo do estado da arte.

Numa primeira fase, pretende-se apenas simular numericamente a transferência de calor na seção transversal 2D de uma cavidade de um tijolo (56 mm de altura por 56 mm de largura) e avaliar a sua performance térmica. Em seguida considera-se uma protuberância cerâmica, do mesmo material do restante tijolo, com espessura igual às partes sólidas da cavidade (8 mm), ligada à superfície superior ou inferior da cavidade, e avalia-se a performance térmica da cavidade em função da localização e do comprimento da protuberância. Depois estuda-se também o desempenho em termos de transferência de calor global de uma cavidade com duas protuberâncias simétricas em relação ao eixo central vertical e ao eixo central horizontal da cavidade. Após esta fase sabe-se qual é a posição da (s) protuberância (s) que traduz (em) o menor número de Nusselt, tendo em conta a menor quantidade de material adicional devido à consideração das protuberâncias.

Numa segunda fase, estuda-se o comportamento térmico global da secção transversal 2D completa do tijolo de 11 (104 mm de largura por 200 mm de altura) e do tijolo de 15 (152 mm de largura por 200 mm de altura), isto segundo a norma NP 834 e NP 80, e para isso exploram-se detalhadamente as configurações considerando as protuberâncias que se apresentaram como as mais promissoras a partir dos resultados obtidos na primeira fase, para uma única cavidade de forma a encontrar a configuração que corresponde ao melhor desempenho global em termos de inibição de transferência de calor.

Após isto, faz-se uma análise custo/benefício de forma a avaliar, de uma forma global, a viabilidade dos tijolos perfurados com protuberâncias.

### 1.3 Objetivos

Pretende-se, com o presente trabalho, simular numericamente a transferência de calor em tijolos com perfurações diferentes das usuais, incluindo protuberâncias cerâmicas do mesmo material e não de outros materiais, pois ao nível do ciclo de vida esta solução não é viável devido à reutilização dos materiais. Com isto pretende-se inibir a convecção natural no interior das cavidades dos tijolos, avaliar o desempenho global das formas alternativas em termos da transferência de calor, e assim apontar direções a seguir rumo a tijolos perfurados com melhores performances de isolamento térmico e tirar um maior proveito das excelentes características isolantes térmicas que o ar proporciona.

### 1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em cinco capítulos distintos, que são a introdução, o estado da arte, a simulação numérica da transferência de calor em tijolos perfurados, a análise custo/benefício e as conclusões.

O Capítulo 2 versa sobre o estado da arte, incidindo sobre os trabalhos anteriores efetuados sobre a modelação e simulação numérica da transferência de calor em tijolos perfurados, mesmo que com perfurações diferentes das usuais, na busca de melhores características de isolamento térmico para os tijolos, e, por conseguinte, para as paredes dos edifícios que os incorporam.

O Capítulo 3 aborda a simulação numérica da transferência de calor em tijolos. O capítulo encontra-se dividido em duas secções, mais concretamente dois casos de estudo. O primeiro caso de estudo envolve apenas uma cavidade do tijolo, estando dividido em três partes: a primeira estuda o comportamento térmico da cavidade individual do tijolo, e nesta secção estabelece-se o modelo físico-matemático que descreve a transferência de calor em tijolos perfurados e definem-se os parâmetros necessários à simulação numérica dos processos de transferência de calor dos tijolos, ou seja, o espaçamento da malha, as condições e simplificações, as propriedades dos materiais, as condições de fronteira e o modelo numérico estabelecido que transforma as equações subjacentes ao modelo físico-matemático em equações passíveis de serem resolvidas pelo código FLUENT®. A segunda parte envolve o estudo do comportamento térmico de uma cavidade do tijolo em função da localização e do comprimento de uma protuberância. A terceira parte avalia o desempenho térmico da cavidade com duas protuberâncias simétricas em relação ao eixo central vertical e ao eixo central horizontal da cavidade.

O segundo caso de estudo envolve o tijolo de 11 e o tijolo de 15, na sua totalidade, estando dividido em duas partes, uma para cada tipo de tijolo. Nestes casos de estudo avalia-se a performance térmica dos tijolos com a (s) protuberância (s) posicionada (s) em

torno das soluções que se apresentaram como as mais promissoras na primeira fase do estudo: a ideia base é que as protuberâncias que conduzem ao melhor desempenho de uma cavidade individual conduzirão também ao melhor desempenho do tijolo como um todo.

O Capítulo 4 corresponde à análise custo/benefício, estando dividido em três secções: a primeira corresponde à avaliação das potenciais poupanças energéticas com a utilização dos novos tijolos, a segunda ao custo de aquisição dos mesmos e a terceira à determinação dos tempos de retorno de investimento para a estação de aquecimento (inverno) e para a estação de arrefecimento (verão). A estação convencional de aquecimento é o período do ano com início no primeiro decêndio posterior a 1 de outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C. A estação convencional de arrefecimento é o conjunto dos quatro meses de verão (junho, julho, agosto e setembro) em que é maior a probabilidade de ocorrência de temperaturas exteriores elevadas que possam exigir arrefecimento ambiente em edifícios com pequenas cargas internas (DL 80/2006). Esta análise é realizada para três localidades de Portugal Continental localizadas em zonas climáticas distintas.

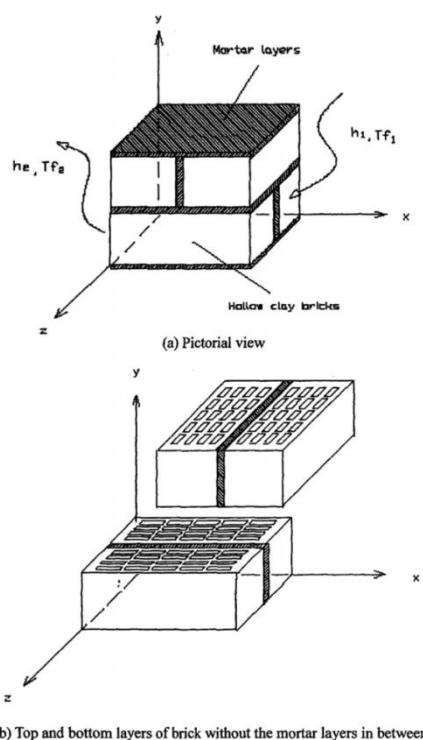
O Capítulo 5 refere-se às conclusões, e apresenta algumas propostas de trabalhos futuros.



## 2 Estado da arte

Existem vários trabalhos relativos à simulação numérica da transferência de calor em tijolos perfurados. O *software* utilizado na quase totalidade desses trabalhos é o FLUENT® da ANSYS®, que é baseado no método dos volumes finitos. Alguns dos trabalhos mais relevantes desenvolvidos usando este *software* são os a seguir discriminados, por ordem cronológica.

Em 2008, Li *et al.* estudaram 50 configurações diferentes de um tijolo perfurado de barro com a dimensão de (240x115x90) mm. Para isso simularam numericamente o tijolo a três dimensões para essas configurações. Os fatores estudados foram a disposição das cavidades ao longo da direção xx bem como da direção zz, segundo a Figura 2.1, a influência da radiação da superfície das cavidades e a diferença de temperaturas entre o exterior e o interior. Realizaram as simulações considerando um domínio constituído por quatro tijolos com a disposição representada na Figura 2.1, sendo de salientar que as cavidades têm a sua base orientada no plano XZ e percorrem a profundidade equivalente ao tijolo (Li *et al.*, 2008b).



**Figura 2.1 - Domínio considerado no trabalho de Li *et al.* (Li *et al.*, 2008b)**

A configuração que tem maior número de cavidades é a que possui 12 na direção zz e cinco na direção xx, ao passo que a configuração com menor número tem apenas uma cavidade.

O caso ótimo entre os 50 tijolos estudados é o tijolo que tem cinco cavidades na direção xx e quatro na direção zz, segundo a Figura 2.1. A condutividade térmica do barro é de  $0,419 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$  e apenas 53,1% do volume do tijolo é constituído pela parte sólida, conseguindo também manter o mesmo nível de isolamento térmico para as várias diferenças de temperatura, desde diferenças de  $20^\circ\text{C}$  até  $50^\circ\text{C}$ . Assim, esta configuração proporciona uma grande poupança de energia caso seja adotada na construção das paredes dos edifícios (Li *et al.*, 2008b).

No mesmo ano, (Li *et al.*, 2008a) fizeram um estudo semelhante utilizando os mesmos fatores, mas desta vez para 72 configurações diferentes de tijolo. Neste estudo a configuração ótima é a que possui oito cavidades na direção xx e quatro na direção zz, segundo a Figura 2.1, mantendo o mesmo nível de isolamento térmico para as várias diferenças de temperatura como no trabalho anterior.

Em 2009, (Sun *et al.*, 2009) estudaram 71 configurações diferentes de tijolo (240x115x90) mm simulado a três dimensões. Os parâmetros testados foram o número de cavidades ao longo da direção do comprimento, 240 mm, e da largura do tijolo, 115 mm segundo a Figura 2.2. A condutividade térmica equivalente (ETC) determinou-se tendo em linha de conta apenas os efeitos da condução, convecção e radiação individualmente, bem como da combinação dos três.

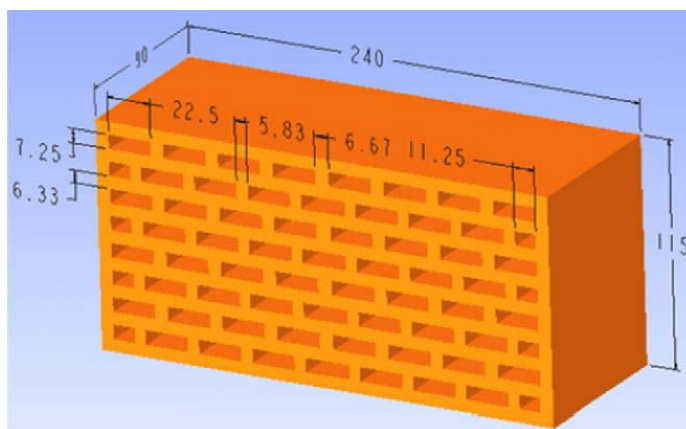


Figura 2.2 - Domínio considerado no trabalho (Sun *et al.*, 2009)

O aumento do número de cavidades na direção do fluxo de calor favorece mais a diminuição da condutividade térmica equivalente (ETC) que na direção perpendicular ao fluxo.

A configuração que traduz a melhor performance de isolamento térmico é a que possui três cavidades na direção horizontal e oito na direção vertical, segundo a Figura 2.2, o valor da ETC neste caso é de  $0,326 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$  sendo a parte sólida do tijolo 23,30% do volume total.

No mesmo ano, (Boukendil *et al.*, 2009) fizeram a simulação numérica a duas dimensões da transferência de calor por condução, convecção e radiação em tijolos formados por

duas partes constituídas por cavidades separadas por uma caixa-de-ar, como ilustra a Figura 2.3.

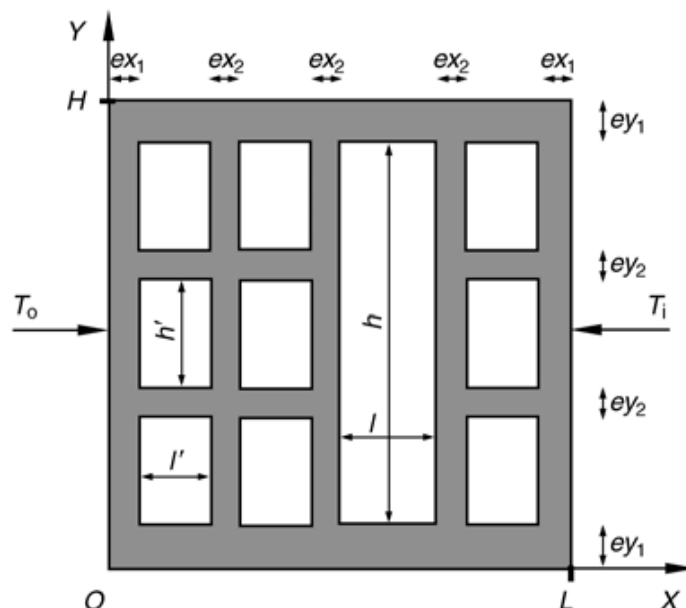


Figura 2.3 - Representação da secção 2D do tijolo-Tipo 1 (Boukendil *et al.*, 2009)

Os parâmetros utilizados para o estudo da transferência de calor global nos tijolos foram a espessura da caixa-de-ar (1, 2, 3 e 4 cm) correspondente à dimensão  $l$  na Figura 2.3, a posição desta, o número de cavidades na vertical (três ou quatro) e as diferenças de temperatura entre as superfícies verticais  $X=0$  e  $X=L$ , segundo a Figura 2.3, com diferenças de temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$  até  $40^{\circ}\text{C}$  em intervalos de  $5^{\circ}\text{C}$ . As conclusões obtidas deste trabalho é que quanto maior é a espessura da caixa-de-ar melhor é a performance de isolamento térmico do tijolo, sendo que as diferenças podem chegar aos 10% entre a espessura de 1 cm e de 4 cm. Um tijolo com três cavidades na direção vertical em detrimento de quatro cavidades representa um melhoramento no isolamento térmico abaixo dos 5% (Boukendil *et al.*, 2009).

Existem também alguns trabalhos realizados em torno desta temática que utilizaram *softwares* baseados no método dos elementos finitos como os em seguida discriminados. Em 2011, (Morales *et al.*, 2011) elaboraram um estudo para minimizar o fluxo de calor através das paredes do tijolo perfurado de barro “Termoarcilla\_29 ECO”, Figura 2.4. Foram estudadas várias geometrias para as secções transversais dos blocos já existentes, de forma a melhorar a sua performance de isolamento térmico. Os parâmetros tomados em conta foram o número de linhas constituídas por cavidades, o tipo de “língua” e arco e a alternância entre as linhas contíguas do tijolo. O COMSOL 3.2 foi o *software* utilizado para a realização das simulações numéricas.

O tijolo estudado tem as seguintes características:

Dimensões: 30x29x19 (cm), espessura interior: 5 mm, espessura exterior: 8 mm, língua e arco: 16 mm, fração ocupada pelas cavidades: inferior a 55%, Perfurações: no mínimo 6 mm.

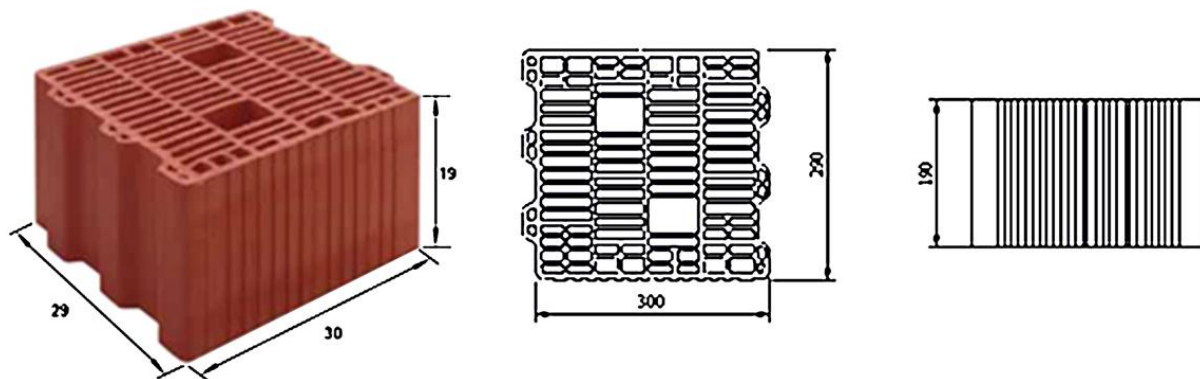


Figura 2.4 - Tijolo Termocilla brick®29 ECO (Morales *et al.*, 2011)

A inclusão de poliestireno expandido (EPS) nas discontinuidades horizontais de 20 a 30 mm faz baixar ainda a condutividade térmica em cerca de 12%.

Com o intuito de melhorar a performance de isolamento térmico a disposição das linhas (cavidades) deve ter a forma de “quincunx”, ou seja linhas paralelas de modo a que todas as linhas sejam posicionadas de maneira a formarem triângulos equiláteros, como mostra a configuração ótima da Figura 2.5. Para além disso, quanto maior for o número de linhas no tijolo e as discontinuidades entre as linhas melhor é a performance de isolamento térmico como também ilustra a Figura 2.5.

Assim, a configuração constituída por geometrias retangulares alternadas, alongadas e de espessura de 40 mm dispostas em 26 linhas no formato “quincunx” diminui a transferência de calor em cerca de 16%.

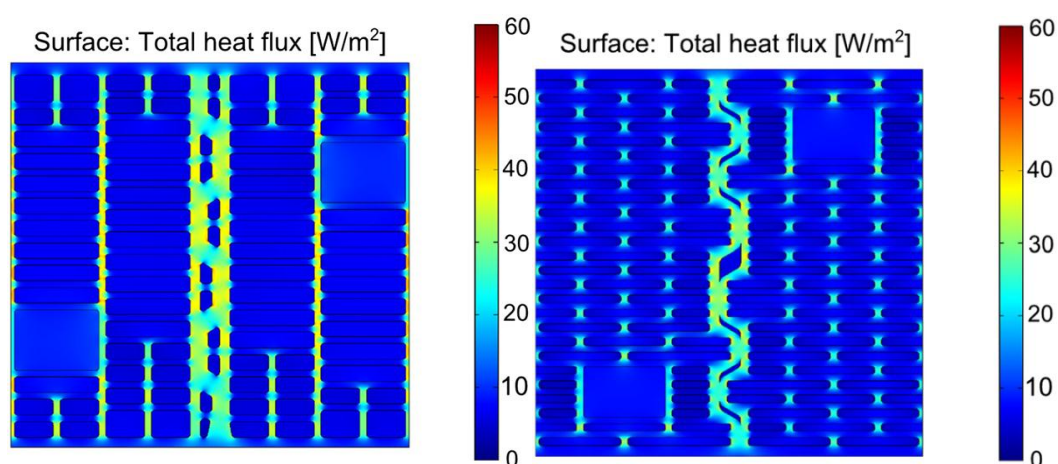


Figura 2.5 - Tijolo padrão e configuração ótima, respetivamente (Morales *et al.*, 2011)

No mesmo ano, Arendt *et al.*, 2011 testaram vários tipos de materiais para os tijolos bem como diferentes combinações de cavidades. Estudaram o comportamento térmico dinâmico de tijolos perfurados e otimizaram as formas das cavidades de forma a reduzir a intensidade da radiação e da convecção natural.

Os modelos com melhores características isolantes térmicas para tijolos perfurados feitos de materiais com condutividades térmicas baixas têm uma percentagem de área ocupada pelas cavidades entre 30 a 45%, como por exemplo o modelo 6 da Figura 2.6. Para tijolos feitos com materiais de elevada condutividade térmica esse valor seria entre 45 a 65%, o que seria impossível de obter tecnologicamente, como por exemplo o modelo 1 da Figura 2.6 (Arendt *et al.*, 2011).

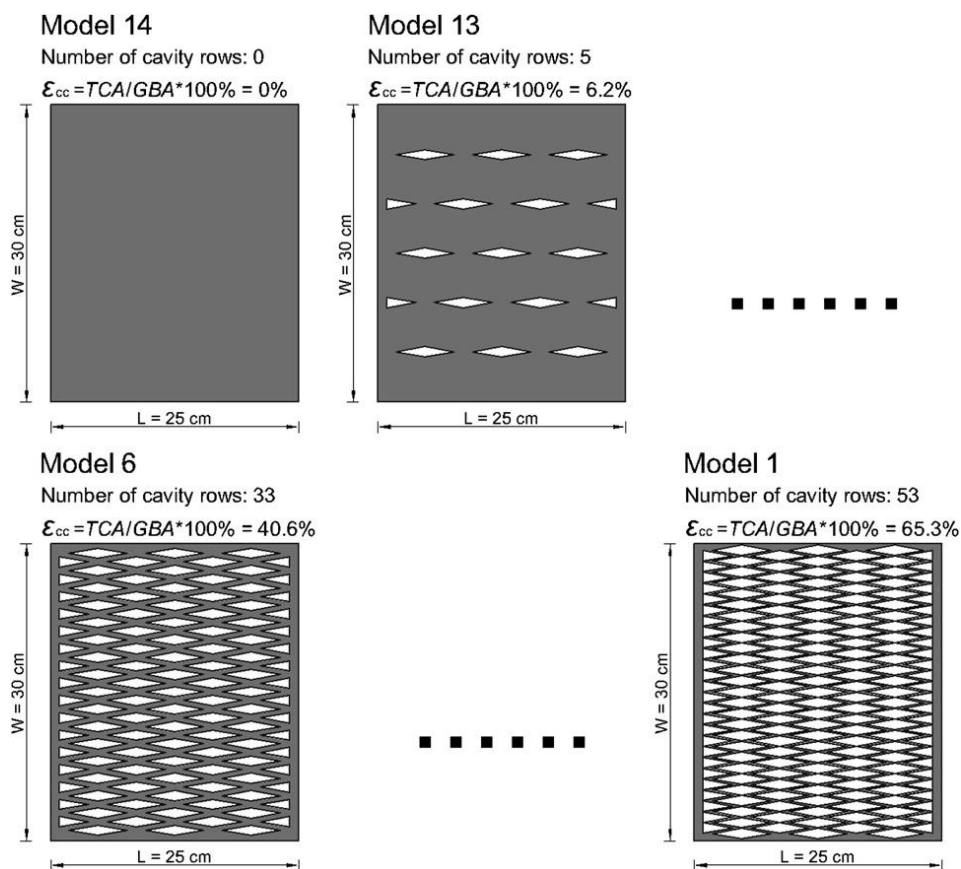


Figura 2.6 - As diferentes geometrias de tijolos perfurados considerados pelo autor (Arendt *et al.*, 2011).

Os materiais testados estão apresentados na Tabela 2.1 (Arendt *et al.*, 2011).

**Tabela 2.1 - Materiais testados no estudo referido (Arendt *et al.*, 2011).**

Table 3

Optimum ratios  $\varepsilon_{cc}$  related to maximum time lag  $\tau_{max}$  and minimum decrement factor  $f_{min}$ .

No [–]	Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m K]	$c_p$ [J/K kg]	$a$ [J/K m <sup>3</sup> ]	$\varepsilon_{cc} (\tau_{max})$ [%]	$\tau_{max}$ [h]	$\varepsilon_{cc} (f_{min})$ [%]	$f_{min}$ [–]
M1	Porous ceramics	1513	0.253	1000	1.67E-07	30.78	17.05	45.56	0.0035
M2	Gypsum	600	0.180	840	3.57E-07	30.78	9.94	45.56	0.0129
M3	AAC 700	700	0.250	840	4.25E-07	35.71	9.96	55.41	0.0138
M4	AAC 400	400	0.150	840	4.46E-07	20.93	8.03	45.56	0.0171
M5	Calcium silicate	1900	1.000	880	5.98E-07	45.56	12.88	55.41	0.0132
M6	Concrete 1800	1800	1.150	840	7.61E-07	45.56	11.75	55.41	0.0175
M7	Concrete 2000	2000	1.350	840	8.04E-07	45.56	11.87	55.41	0.0185
M8	Artificial stone	1750	1.300	920	8.07E-07	45.56	11.40	55.41	0.0201
M9	Concrete 2200	2200	1.650	840	8.93E-07	45.56	11.72	55.41	0.0212
M10	Sandstone	2600	2.300	920	9.62E-07	45.56	11.78	65.26	0.0228

\*AAC – autoclaved aerated concrete.

É de salientar que todos os trabalhos exceto os de Boukendil *et al.* (2009) e Arendt *et al.* (2011) estudaram o tijolo colocado na vertical, ou seja ao contrário da disposição dos tijolos normalmente utilizados na construção civil em Portugal.

No estudo da transferência de calor em tijolos perfurados na vertical, observa-se que a totalidade do volume das cavidades é constituída exclusivamente por ar, embora na realidade uma porção acabe por ser preenchida por argamassa durante a construção das paredes. Consequentemente, os resultados apresentados nos trabalhos com este tipo de tijolo acabam por não ser os mais realistas.

Existem outros trabalhos que recorrem a outra metodologia na busca da melhoria das características de isolamento térmico dos tijolos perfurados. Essa metodologia consiste na incorporação de materiais isolantes térmicos no interior das cavidades dos tijolos, como por exemplo no trabalho de Al-Hazmy (2006) que estudou o efeito das barras de poliestireno comum, que melhora o isolamento térmico em cerca de 36%, e de barras de poliestireno ocas, que melhora em cerca de 6% (Al-Hazmy, 2006).

Em 2010 (Al-Hazmy, 2010) estudou o comportamento térmico de um tijolo perfurado com chapas dobradas no interior das suas cavidades, estudando três chapas com condutividades térmicas diferentes, e tendo concluído que a performance de isolamento térmico pode ser melhorada em cerca de 40 a 50% por essa via.

Já existem tijolos com melhores características isolantes térmicas no mercado, por exemplo em Portugal a empresa Construcer desenvolveu o TermoTecno® com os modelos TT19 e TT24 com as dimensões 30x20x19 e 30x20x24, respetivamente, tijolo esse que é cortado em forma curva nos topos para permitir o uso de juntas sem argamassa (CONSTRUCER, 2011).

### 3 Simulação numérica da transferência de calor em tijolos perfurados

Neste capítulo estuda-se o comportamento térmico do tijolo de 11 e do tijolo de 15. No caso de estudo 1 simula-se o comportamento térmico ao nível de uma cavidade individual dos tijolos. No caso de estudo 2 simula-se o comportamento térmico considerando o tijolo de 11 e o tijolo de 15 na sua totalidade.

Os parâmetros utilizados para as simulações destes casos de estudo são os mesmos, ou seja, o mesmo espaçamento da malha, o mesmo modelo físico-matemático, as mesmas condições e simplificações, e o mesmo modelo numérico assim como o respetivo critério de convergência. Apenas as condições de fronteira de temperatura do caso de estudo 1 são diferentes das do caso de estudo 2.

#### 3.1 Caso de estudo 1

No primeiro caso de estudo simula-se numericamente uma cavidade individual, e avalia-se o seu desempenho global em termos de transferência de calor.

##### 3.1.1 Caso de estudo 1.1

Na primeira parte do caso de estudo pretende-se simular o comportamento térmico de uma cavidade individual de um tijolo padrão, como mostra a Figura 3.1, por forma a avaliar a sua performance térmica.

Aqui também se validam os resultados, e as etapas necessárias para essa validação são a definição da geometria, da malha, do modelo físico-matemático e do modelo numérico.

A Figura 3.1 representa a geometria associada a uma cavidade de um tijolo no domínio bidimensional.

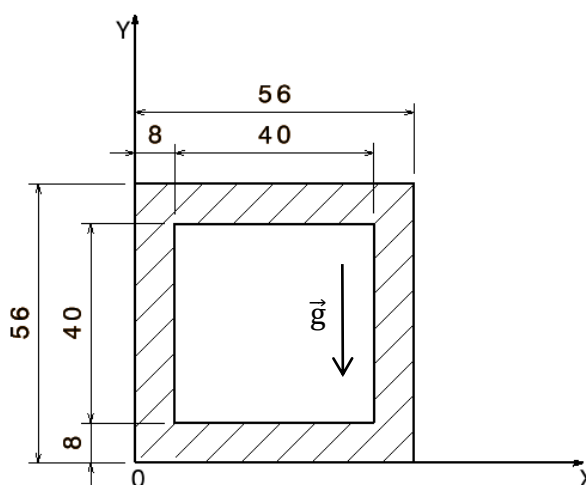
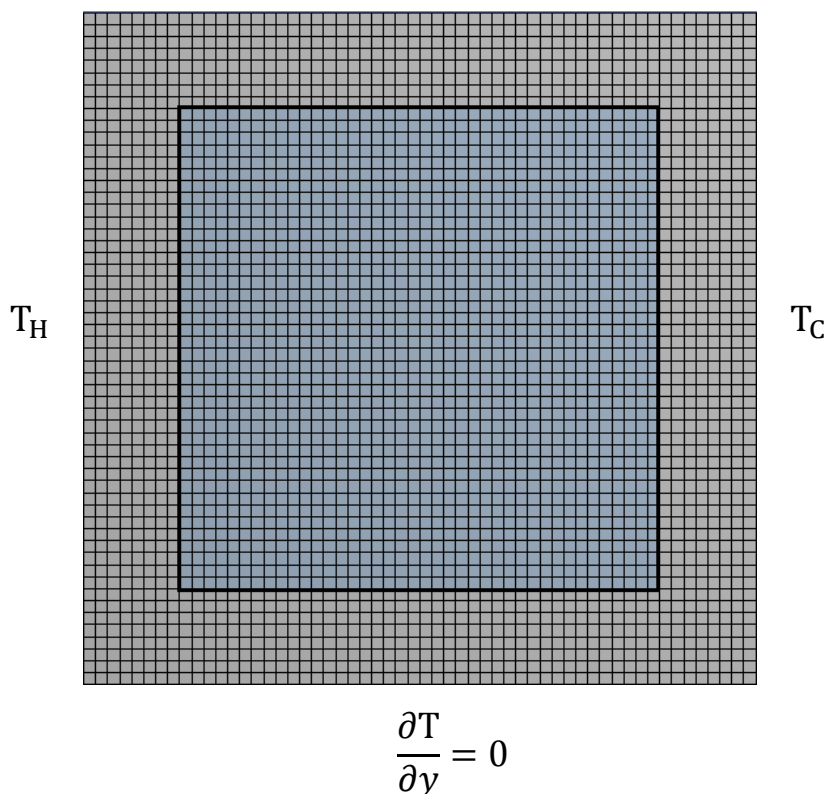


Figura 3.1 - Vista da secção transversal da cavidade individual de um tijolo (dimensões em mm).

### ***Geração da malha***

Em relação à malha, a escolha recaiu sobre uma malha ortogonal quadrada, e realizou-se o estudo de independência de malha. Assim, começou-se por atribuir um espaçamento de malha de 2 mm, ou seja uma malha de 28x28 elementos, depois refinou-se a malha para um espaçamento de 1 mm, o que corresponde a uma malha de 56x56 elementos, representada na Figura 3.2. Como os resultados obtidos para o fluxo de calor na parede exterior à temperatura  $T_H$  diferem apenas em cerca de 0,92%, obtendo-se a independência de malha, tal como acontece nos vários trabalhos realizados anteriormente nesta área como é o caso do trabalho realizado por (Li *et al.*, 2008b) cuja independência de malha é obtida com diferenças de resultados na ordem dos 2%. Deste modo, não é necessário ter uma malha mais refinada pois o tempo despendido na simulação seria maior e o resultado obtido seria praticamente o mesmo. A Figura 3.2 representa a malha considerada bem como as condições fronteira para a temperatura, que são apresentadas à frente com maior detalhe.

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$$



**Figura 3.2 - Malha correspondente à cavidade do tijolo e respectivas condições de fronteira.**



### Modelo físico-matemático

Esta secção refere-se ao modelo físico-matemático utilizado na simulação numérica da transferência de calor em tijolos perfurados. As equações de Navier-Stokes e a equação da conservação da energia, Equação (3.3), descrevem o fenómeno de convecção natural no interior das cavidades dos tijolos. Dentro das equações de Navier-Stokes existe a equação da continuidade, ou da conservação da massa, Equação (3.1), as equações da quantidade de movimento em  $xx$  e em  $yy$ , Equações (3.2a) e (3.2b), respetivamente (Incropera e Dewitt, 2005).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.2a)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \quad (3.2b)$$

$$\rho C_P \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.3)$$

Na parte sólida do tijolo a velocidade é nula, pelo que o problema se resume à equação da difusão de calor, Equação (3.4), que representa a transferência de calor nos elementos sólidos do tijolo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.4)$$

### Condições e simplificações

A Tabela 3.1 representa as propriedades térmicas do ar e do barro vermelho (Incropera e Dewitt, 2005). A condutividade térmica do barro vermelho provém do CTCV (centro da tecnologia da cerâmica e do vidro).

**Tabela 3.1 - Propriedades do ar e do barro vermelho utilizados no FLUENT®.**

Propriedades	Ar	Barro vermelho
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1,225	1667
$C_p$ (J/kg.°C)	1006,43	835
$k$ (W/m.°C)	0,0242	0,6
$\mu$ (kg/m.s)	1,789E-05	-
$\beta$ (1/K)	0,003356	-
Pr	0,71	-

As condições e simplificações tidas em conta na resolução das equações diferenciais que regem os fenómenos em estudo são as seguintes:

- Regime estacionário;
- Regime laminar ( $R_a < 10^9$ );
- O ar é considerado um fluido Newtoniano;
- As propriedades do ar e do barro vermelho são constantes;
- A aproximação de Boussinesq para considerar a variação da massa volúmica do ar com a temperatura no termo de impulsão como mostra a Equação (3.5) (Sun *et al.*, 2009) e admitindo que a densidade do ar é constante exceto no termo de impulsão;

$$\rho = \rho_c [1 - \beta(T - T_c)] \quad (3.5)$$

- A transferência de calor por radiação não é relevante para o processo, dados os baixos níveis térmicos e as reduzidas diferenças de temperatura;

O número de Rayleigh é um número adimensional associado à convecção natural; quando este valor é mais baixo do que o valor crítico para um determinado fluido então a transferência de calor ocorre por condução, e quando excede esse valor a transferência ocorre essencialmente por convecção. A Equação (3.6) representa o número de Rayleigh.

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu\alpha} \quad (3.6)$$

O número de Rayleigh determinado tem em conta os 56 mm de altura e não os 40 mm ocupados pelo ar, ou seja, inclui também a parte sólida de uma cavidade. Esta consideração serve de base de comparação para o caso de estudo entre os tijolos de 11 e de 15. Nesses tijolos não é considerada a altura total dos tijolos, pois o fenómeno de convecção natural ocorre em cada cavidade individual separadamente.

Na presente dissertação o número de Nusselt é um parâmetro de extrema importância, pois permite quantificar o calor global transferido através de um elemento, que pode ser uma cavidade ou um tijolo completo. O número de Nusselt é uma grandeza que permite determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, e é o quociente entre o calor transferido por convecção e o calor que seria transferido apenas por condução num meio estagnado sujeito à mesma diferença de temperatura, como mostra a Equação (3.7).

$$Nu = \frac{\dot{Q}}{K_f \frac{\Delta T}{L} H \times 1} \quad (3.7)$$

No cálculo do número de Nusselt, a condutividade térmica para a situação de condução pura (Equação (3.7)) foi a condutividade térmica do ar, isto de forma a haver um termo de comparação do efeito da convecção natural entre os vários casos de estudo.

### **Condições de fronteira**

As condições de fronteiras adotadas no programa de simulação numérica para resolver as equações referentes ao modelo físico-matemático do problema são:

$$x = 0 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad T_H = 35^\circ\text{C} \quad (3.8)$$

$$x = 56 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad T_C = 31,6^\circ\text{C} \quad (3.9)$$

$$y = 0 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.10)$$

$$y = 56 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.11)$$

Sobre as partes sólidas do sistema a velocidade é nula. Na interface entre as partes sólidas e o ar verifica-se a continuidade na temperatura e no fluxo de calor, e a condição de não escorregamento impõe velocidade nula para o ar.

As temperaturas impostas para as fronteiras têm apenas em conta a diferença de temperatura na cavidade, e assim sendo a diferença de temperaturas entre as paredes quente e fria é de  $3,4^\circ\text{C}$ , que corresponde a um número de Rayleigh de  $6,8 \times 10^4$ . Utiliza-se este valor com vista à validação dos modelos físico-matemático e numérico do problema. A aceleração gravítica  $g$  utilizada é de  $9,81 \text{ m/s}^2$  no sentido negativo do eixo dos YY da Figura 3.1.

### **Modelo numérico**

O modelo numérico utilizado para a resolução das Equações (3.1) a (3.4), sujeitas às condições de fronteira, Equações (3.8) a (3.11), e à aproximação de Boussinesq, Equação (3.5), baseia-se no método dos volumes finitos que o FLUENT® utiliza. Neste método, cada nó da malha corresponde ao centro de cada volume de controlo como mostra a Figura 3.3, e o *software* converte as equações diferenciais que regem o problema em equações algébricas, de forma a serem resolvidas analiticamente. Este procedimento consiste em integrar as equações regentes em cada volume de controlo, resultando num

sistema equações discretizadas que conservam cada uma das quantidades em cada volume de controlo. A discretização das equações regentes pode ser facilmente demonstrada considerando a equação integral de conservação, em regime estacionário, para o transporte da variável dependente escalar  $\phi$ , para um volume de controlo  $V$  como mostra a Equação (3.12) (ANSYS, 2010).

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \iiint S_{\phi} dV \quad (3.12)$$

em que  $\rho$  é a massa volúmica,  $\vec{v}$  é o vetor de velocidade,  $A$  é a área do volume de controlo,  $\Gamma_{\phi}$  é o coeficiente de difusão de  $\phi$  e  $S_{\phi}$  é o respetivo termo de fonte. A equação anterior aplica-se a cada volume de controlo do domínio computacional resultando a integração na Equação (3.13).

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (3.13)$$

em que  $N_{faces}$  é o número de faces por célula,  $\phi_f$  é o valor de  $\phi$  ligado à face  $f$  da célula,  $(\rho_f \phi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f)$  é o fluxo mássico de  $\phi$  através da face  $f$ ,  $\nabla \phi_f$  é a magnitude de  $\nabla \phi$  normal à face  $f$  da célula e  $V$  é o volume da célula.

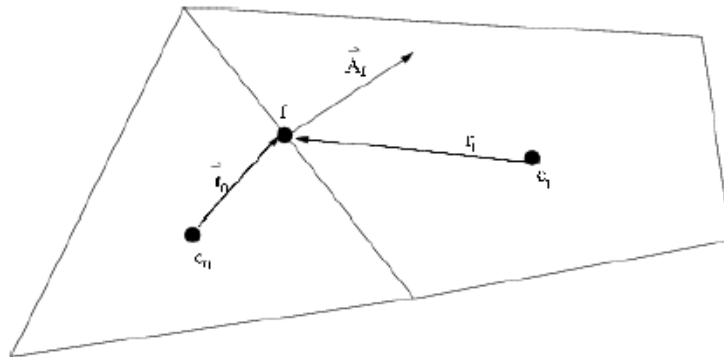


Figura 3.3 - Ilustração da discretização da equação integral de transporte de um escalar (ANSYS, 2010).

Por defeito, o FLUENT® coloca os valores discretos do escalar  $\phi$  no centro das células ( $c_0$  e  $c_1$  da Figura 3.3). Porém, os valores de  $\phi$  nas interfaces  $\phi_f$  são necessários ao cálculo dos termos convectivos da Equação (3.13). Em consequência disso, é necessário interpolar os valores de  $\phi$  nos centros das células. Isto realiza-se usando um esquema de Interpolação. O esquema utilizado para a resolução das equações da quantidade de movimento e da energia é o “*Second Order Upwind*” (SOU), pois tem maior precisão já que o escoamento atravessa as linhas da malha obliquamente e o erro de difusão numérica é menor que no esquema “*First Order Upwind*” (FLUENT, 2006). Este esquema é preferencialmente utilizado em escoamentos com baixos número de Reynolds, como é o caso deste

problema, onde os efeitos difusivos podem mesmo ser dominantes sobre os efeitos convectivos (Gaspar P.D., 2003) .

Neste esquema de interpolação as quantidades nas faces dos volumes de controlo são calculadas através de uma aproximação linear e multidimensional de reconstrução. A precisão de ordem superior é conseguida nas faces do volume de controlo através da expansão em série de Taylor da solução centrada no volume do controlo em relação ao seu centroide (Equação 3.14):

$$\phi_{f,sou} = \phi + \nabla\phi \cdot \Delta\vec{r} \quad (3.14)$$

onde  $\phi$  e  $\nabla\phi$  são os valores no centro do volume de controlo e o seu gradiente no volume de controlo a montante ao centróide da face, respetivamente. Esta formulação requer a determinação do gradiente através do teorema da divergência em todos os volumes de controlo (ANSYS, 2010).

O FLUENT® utiliza algoritmos para discretizar as equações regentes associadas ao problema. Assim, o algoritmo de solução utilizado no código FLUENT® é o “*Pressure Based*” pois é o mais indicado para escoamentos incompressíveis a baixas velocidades como é o caso deste problema. O algoritmo utilizado para a ligação entre a velocidade e a pressão (*Pressure-Velocity Coupling*) é o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). A pressão é obtida usando o algoritmo PRESTO! (PREssure STagerring Option) pois é um problema de convecção natural. Apesar dos números de Rayleigh e da rotação do escoamento não ser elevada este esquema garante maior exatidão na convergência da solução final (FLUENT, 2006).

Em relação aos fatores de sub-relaxação utilizados são os mesmos que estão definidos por defeito no código FLUENT® (0.3 para a pressão, 1 para a massa volúmica (apesar de ser irrelevante pois é considerada constante neste caso), 1 para as forças de corpo e 1 para a energia) com a exceção do valor do fator de relaxação associado às componentes de velocidade, que é de 0,4 em vez dos 0,7 definidos por defeito no programa, para garantir a convergência e a estabilização dos valores dos campos das variáveis independentes do problema. Tal modificação deve-se ao facto de ser um problema de convecção natural, com uma forte ligação entre a temperatura e a velocidade (ANSYS, 2010).

### ***Convergência do processo iterativo***

O resíduo total é a soma dos módulos dos resíduos para todos os volumes de controlo, e é adimensionalizado por uma grandeza ponderada pelo fluxo mássico no domínio. O critério de convergência definido para o processo iterativo impõe um resíduo adimensionalizado máximo de  $10^{-5}$  para a equação da continuidade e para as componentes da velocidade em  $xx$  e em  $yy$ , e de  $10^{-6}$  para a equação da energia. A evolução gráfica dos resíduos obtidos encontra-se no anexo A, Figura A.1. Para a simulação da primeira parte deste caso de estudo foram consideradas 1300 iterações globais.

### ***Resultados e validação do modelo***

O valor do número de Nusselt obtido é de 9,91, enquanto que o valor padrão é de 9,69, valor obtido através da linha de código em Fortan<sup>®</sup> realizado (V.A.F. Costa, 2012), e segundo a Equação (3.15) o erro relativo entre o valor do Nusselt obtido com o modelo padrão e o modelo obtido com o código FLUENT<sup>®</sup> é:

$$\text{erro relativo (\%)} = \left| \frac{Nu_{\text{obtido}} - Nu_{\text{padrão}}}{Nu_{\text{padrão}}} \right| \times 100 \quad (3.15)$$

O valor desse erro é de cerca de 2%, o que significa que os parâmetros e métodos utilizados no programa são os adequados. Esta comparação com os resultados para as cavidades sem protuberâncias é fundamental, pois não existem resultados válidos para as cavidades com protuberâncias. Assim, neste momento há condições para prosseguir com os restantes casos de estudo deste trabalho.

As Figuras 3.4 e 3.5 representam o campo de temperaturas da cavidade individual de um tijolo e o seu campo das magnitudes das velocidades, respetivamente.

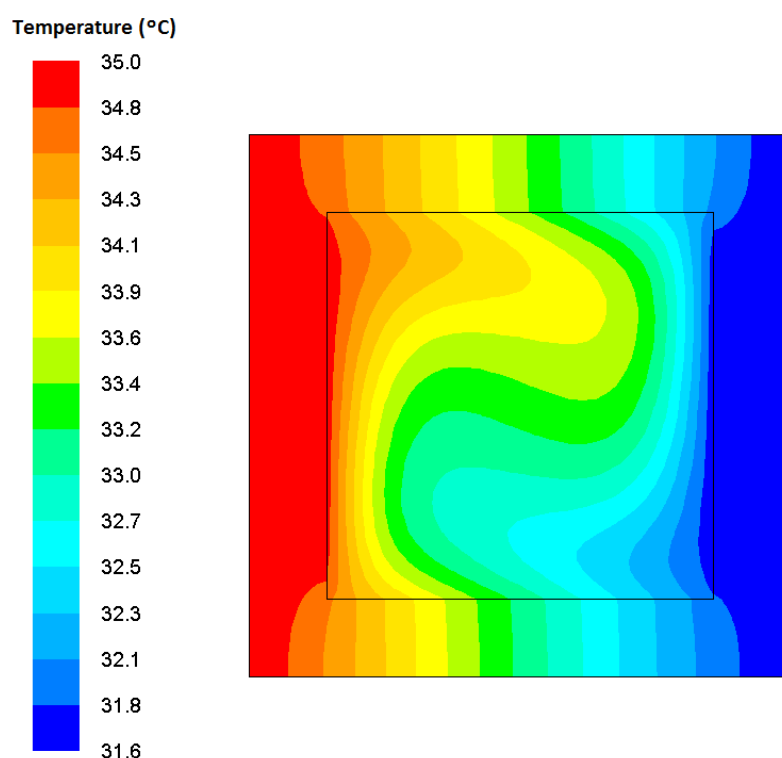


Figura 3.4 - Campo de temperaturas da cavidade individual de um tijolo.

Na Figura 3.5, verifica-se o efeito da convecção natural descrito na parte introdutória da presente dissertação.

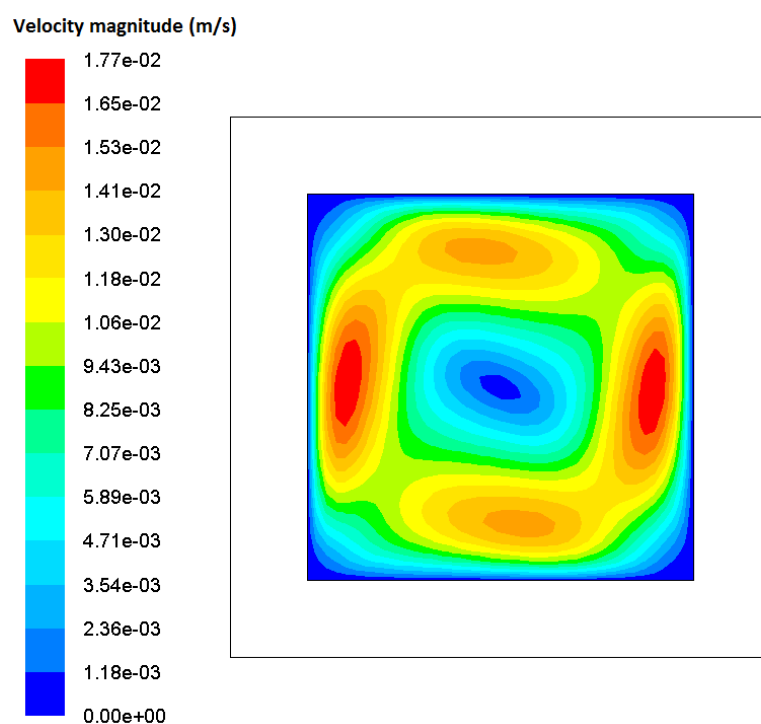


Figura 3.5 - Campo das magnitudes das velocidades na cavidade individual de um tijolo.

### 3.1.2 Caso de estudo 1.2

Na segunda parte do caso de estudo pretende-se simular o comportamento térmico de uma cavidade de um tijolo em função da localização e do comprimento de uma protuberância colocada no seu interior, como indica a Figura 3.6. Segundo esta figura, a localização é representada por  $X$ , distância entre o centro da protuberância e a parede vertical esquerda da cavidade, e o comprimento da protuberância por  $L$ . Este caso de estudo consiste em determinar a localização e o comprimento da protuberância que corresponde à menor transferência de calor global através da cavidade.

O material das protuberâncias é o mesmo que o do resto do tijolo, ou seja barro vermelho, e tem a mesma espessura que os restantes elementos sólidos do tijolo (8 mm).

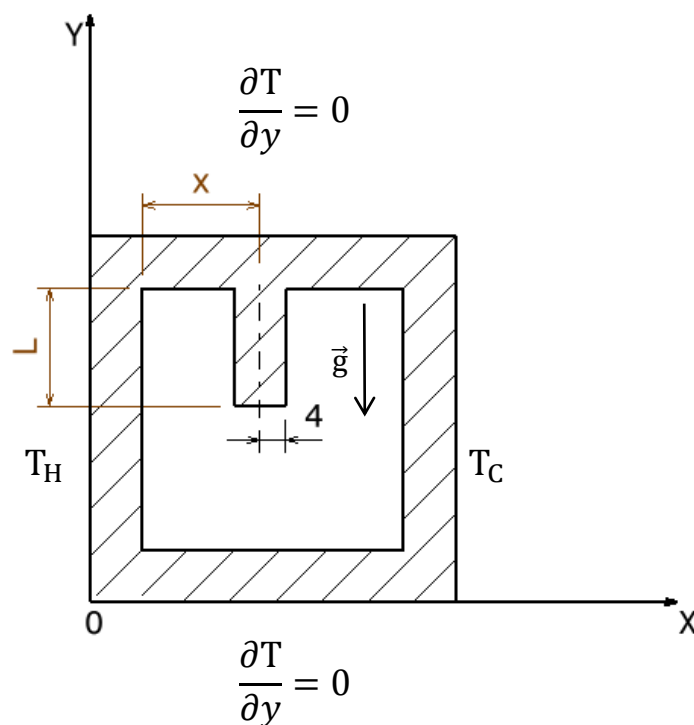
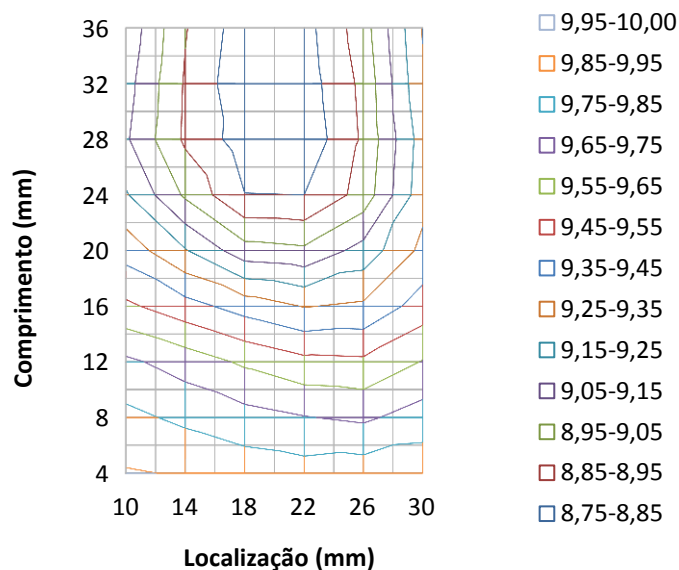


Figura 3.6 - Vista da secção transversal da cavidade do tijolo com uma protuberância (dimensões em mm).

As características inicialmente consideradas correspondem à localização  $X$  de 10 mm e a um comprimento  $L$  de 4 mm, pois para valores inferiores a colocação de uma protuberância iria traduzir-se num número de Nusselt superior à situação da cavidade de tijolo convencional. O varrimento considerado para as características das protuberâncias tem um passo de 4 mm, como mostra a Figura 3.7. O maior comprimento considerado é de 36 mm, pois a partir daí verifica-se um aumento no valor do número de Nusselt devido ao aumento do efeito da condução de calor na protuberância. A localização máxima é de 30 mm pela mesma razão de se considerar 10 mm como a localização com menor valor.





**Figura 3.7 - Número de Nusselt em função da localização e do comprimento da protuberância.**

Pela análise da Figura 3.7 verifica-se que o intervalo de localização entre 18 e 22 mm e comprimento entre 24 e 36 mm corresponde à região com menor número de Nusselt. Desta forma a Figura 3.8 representa o intervalo anteriormente mencionado com um varrimento mais refinado, com passos de 1 mm para a localização e de 2 mm para o comprimento.

Verifica-se que à medida que o valor da localização aumenta o número de Nusselt diminui até sensivelmente a uma localização próxima do centro da cavidade, e que a partir daí volta a aumentar novamente. O mesmo acontece com o comprimento, com o número de Nusselt a diminuir para um comprimento até cerca de 24 mm. Na Figura 3.8 é possível saber até que ponto esse valor diminui, correspondendo a um comprimento de 30 mm, e a partir daí o valor do número de Nusselt aumenta com o comprimento da protuberância devido ao aumento do efeito da condução de calor.

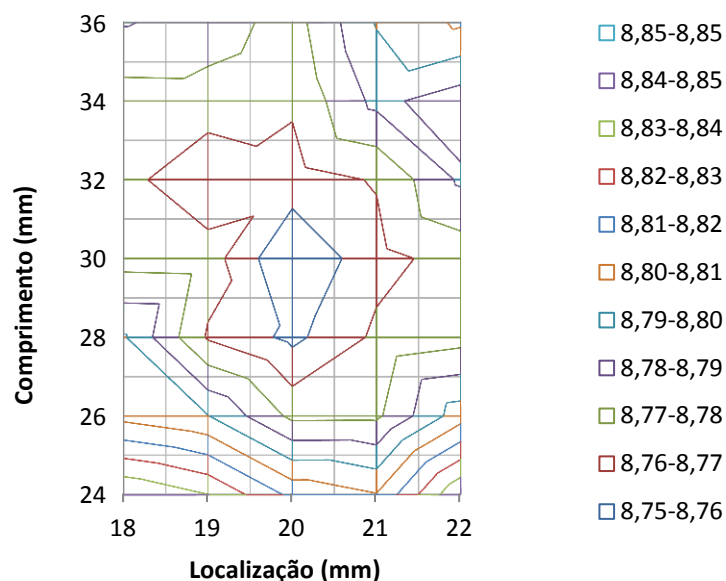


Figura 3.8 - Número de Nusselt em função da localização e do comprimento da protuberância [X,L]=[18:22,24:36].

Segundo a Figura 3.8 a localização **20 mm** e o comprimento **30 mm** corresponde ao ponto ótimo, com um número de Nusselt de **8,75**. Pela Equação (3.16) verifica-se que esta configuração corresponde a uma redução no número de Nusselt em cerca de **12%** comparativamente à cavidade de tijolo convencional.

$$Redução (\%) = \left| \frac{Nu_{novo} - Nu_{padrão}}{Nu_{padrão}} \right| \times 100 \quad (3.16)$$

$$Nu_{padrão} = 9,91$$

$$Nu_{novo} = 8,75$$

Essa redução deve-se a um aumento da transferência de calor por condução proporcionado pela protuberância, como evidencia a Figura 3.9, pois tem uma distribuição de temperaturas mais uniforme relativamente à cavidade original (Figura 3.4, e mais semelhante a uma situação condutiva, com as isotérmicas sendo mais paralelas entre si. Em contrapartida, a presença da protuberância minimiza o efeito da convecção natural como mostra a Figura 3.10, em que a ordem de grandeza da velocidade traduzida pelas magnitudes das velocidades é menor face ao caso da cavidade de tijolo convencional (Figura 3.5), o que leva a uma diminuição da transferência de calor global. É de salientar que os resultados são os mesmos estando a protuberância estando fixa à superfície superior ou inferior da cavidade.

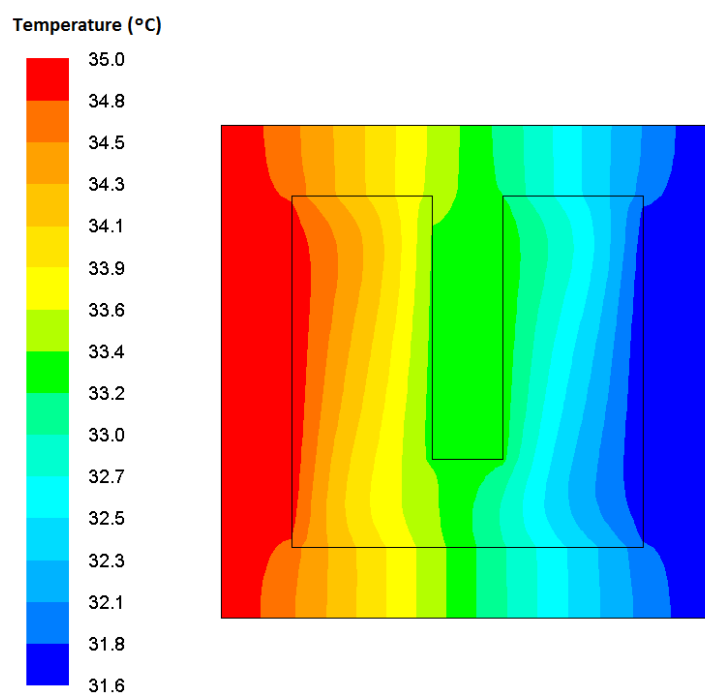


Figura 3.9 - Campo de temperaturas da cavidade de um tijolo com uma protuberância ótima.

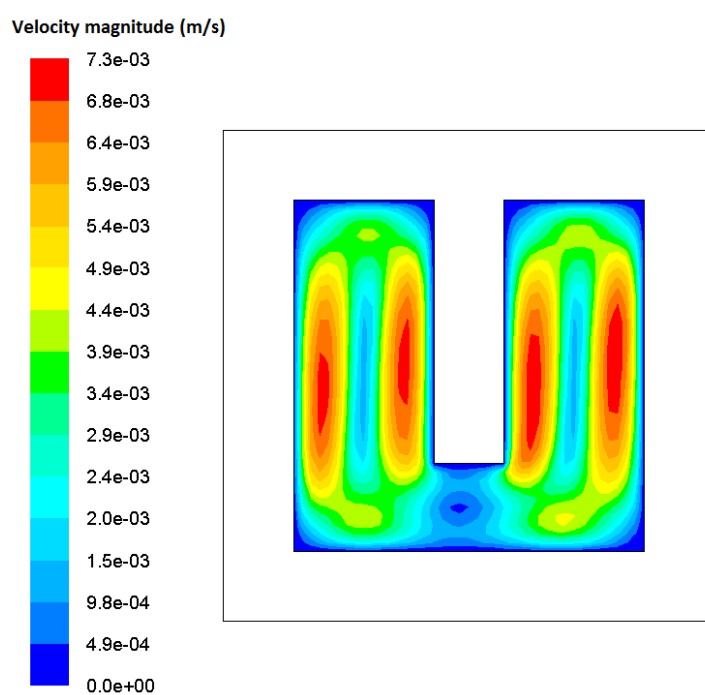


Figura 3.10 - Campo das magnitudes das velocidades na cavidade de tijolo com uma protuberância ótima.

### 3.1.3 Caso de estudo 1.3

A terceira parte do caso de estudo incide sobre uma cavidade com duas protuberâncias acopladas, simétricas em relação ao eixo central vertical e ao eixo central horizontal da cavidade, como representado na Figura 3.11.

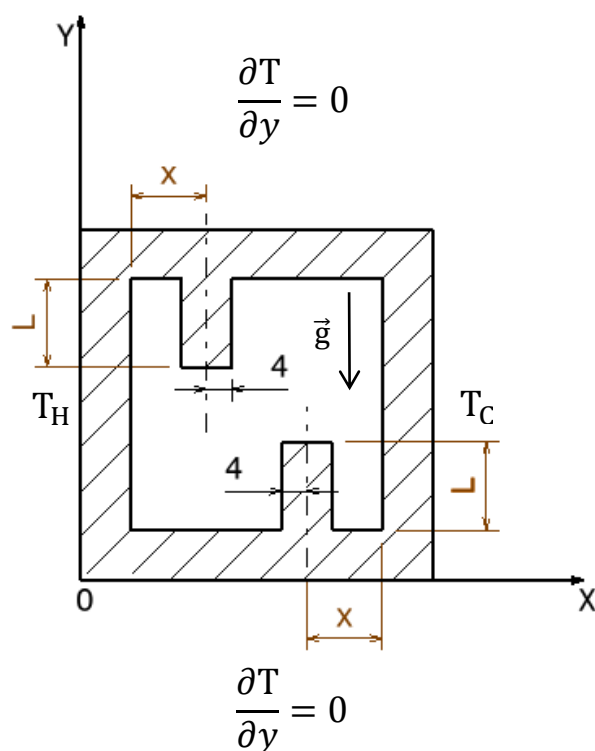


Figura 3.11 - Vista da secção transversal da cavidade do tijolo com duas protuberâncias (dimensões em mm).

### Resultados

A Figura 3.12 representa o número de Nusselt em função da localização e comprimento das duas protuberâncias.

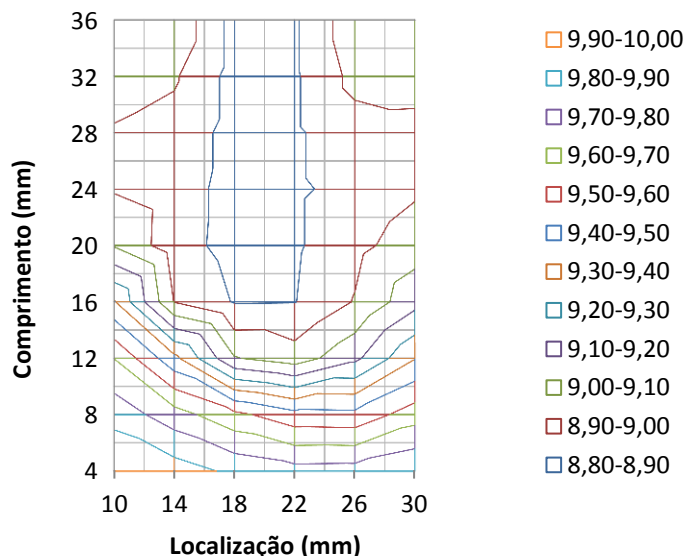


Figura 3.12 - Número de Nusselt em função da localização e comprimento das duas protuberâncias.

Pela análise da figura a região correspondente a uma localização entre 18 a 22 mm e a um comprimento entre 16 a 36 mm é a que corresponde ao menor valor do número de Nusselt. Como nesta região as protuberâncias não podem situar-se numa localização entre 15 e 25 mm e num comprimento superior a 20 mm, a posição ótima para esta solução corresponde à localização de **20 mm** e ao comprimento de **18 mm** com um número de Nusselt associado de **8,86**. Daqui se conclui que é um valor superior ao caso de estudo da cavidade com uma única protuberância. Além do mais, a quantidade de material associada à inclusão de duas protuberâncias é maior que a associada a apenas uma protuberância.

Deste modo, segundo a Equação (3.16) a redução no valor do número de Nusselt é de cerca de **11%**. Isto significa que o maior aumento da transferência de calor por condução devido à existência de duas protuberâncias não é acompanhado por uma redução correspondente na transferência de calor por convecção. Apesar disto, a distribuição de temperaturas é relativamente uniforme face à cavidade individual (Figura 3.4) e a ordem de grandeza da velocidade dada pelas magnitudes das velocidades é inferior à da cavidade individual (Figura 3.5) como mostram as Figuras 3.13 e 3.14, respetivamente.

Em suma, a configuração da cavidade de tijolo conducente à menor transferência de calor corresponde àquela que possui uma única protuberância com uma localização de **20 mm** e um comprimento de **30 mm**.

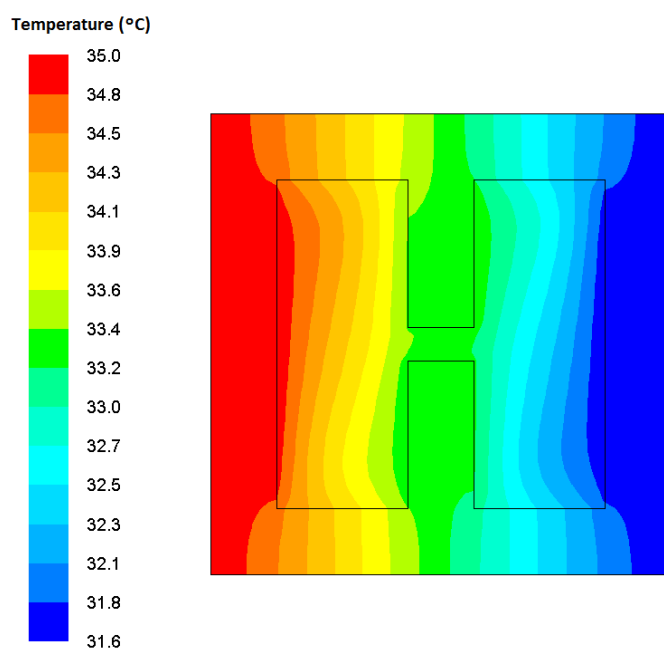


Figura 3.13 - Campo de temperaturas da cavidade de um tijolo com duas protuberâncias ótimas.

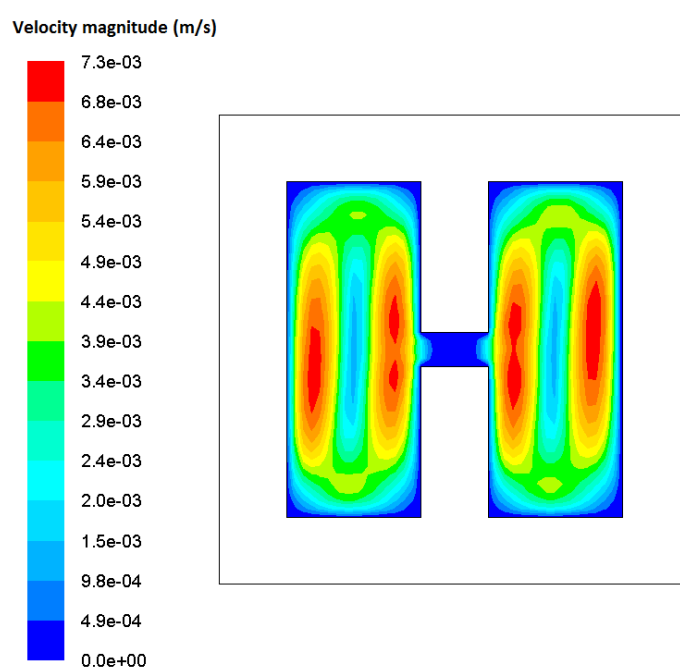


Figura 3.14 - Campo das magnitudes das velocidades na cavidade com duas protuberâncias ótimas.

### 3.2 Caso de estudo 2

Após encontrar o ponto ótimo para a situação de uma única cavidade de tijolo, agora tem-se uma noção bastante precisa de onde poderá ficar o ponto ótimo para a localização e para o comprimento das protuberâncias ótimas nas cavidades dos tijolos de 11 e de 15, que é em torno da localização e comprimento que representam a menor transferência de calor na cavidade do caso de estudo 1. Assim, o intervalo da localização e do comprimento para a determinação do ponto ótimo em ambos os tijolos está compreendido entre 17 a 22 mm e a 28 a 32 mm, respectivamente, como indica a Figura 3.16.

#### 3.2.1 Caso de estudo 2.1

A Figura 3.15 representa a vista da secção transversal de um tijolo de 11 completo com as protuberâncias no interior das suas cavidades.

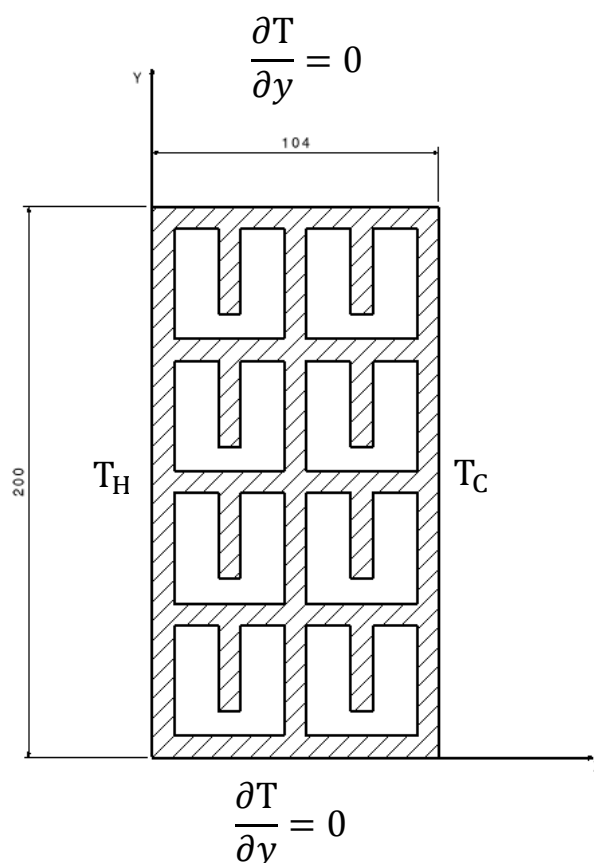


Figura 3.15 - Vista da secção transversal de um tijolo de 11 com protuberâncias ótimas (dimensões em mm).

### Condições de fronteira

As condições de fronteiras adotadas no programa de simulação numérica para resolver as equações diferenciais referentes ao modelo físico-matemático do problema são:

$$x = 0 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad T_H = 35^\circ\text{C} \quad (3.15)$$

$$x = 104 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad T_C = 28,2^\circ\text{C} \quad (3.16)$$

$$y = 0 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.17)$$

$$y = 200 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.18)$$

Repare-se que a diferença de temperaturas face a face é de  $6,8^\circ\text{C}$ , ou seja, duas vezes maior que no caso de estudo 1, pois o tijolo tem duas cavidades na direção do fluxo de calor, ou seja, na direção X como mostra a Figura 3.15. Assim, o número de Rayleigh em cada cavidade individual permanece essencialmente o mesmo.

A evolução gráfica dos resíduos obtidos encontra-se em anexo A, na Figura A.2. Para a simulação numérica deste caso de estudo foi definido um total de 5.000 iterações.

### Resultados

A Figura 3.16 apresenta o número de Nusselt em função da localização e do comprimento da protuberância no interior intervalo anteriormente referido.

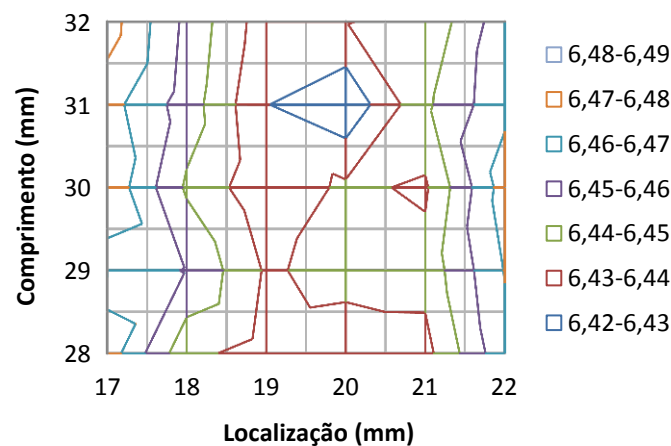


Figura 3.16 - Número de Nusselt em função da localização e do comprimento das protuberâncias para o tijolo de 11.



Segundo a figura o ponto ótimo situa-se na posição referente à localização **20 mm** e ao comprimento **31 mm**, com um número de Nusselt de **6,42**, ao passo que o valor padrão do número de Nusselt é de 7,63 (obtido tomando o tijolo completo sem as protuberâncias).

Desta forma, pela Equação (3.16) verifica-se que esta configuração corresponde a uma redução no número de Nusselt em cerca de **16%** comparativamente ao tijolo de 11 convencional.

Essa redução deve-se a um aumento da transferência de calor por condução proporcionado pelas protuberâncias evidenciado na Figura 3.18, pois tem uma distribuição de temperaturas mais uniforme e gradativo, do tipo condutivo, relativamente ao tijolo de 11 convencional (Figura 3.17). Em contrapartida, as protuberâncias inibem a convecção natural como mostra a Figura 3.20, na qual a ordem de grandeza da velocidade expressa através das magnitudes das velocidades é menor face ao que ocorre no tijolo de 11 convencional (Figura 3.19), o que leva a uma diminuição da transferência de calor global.

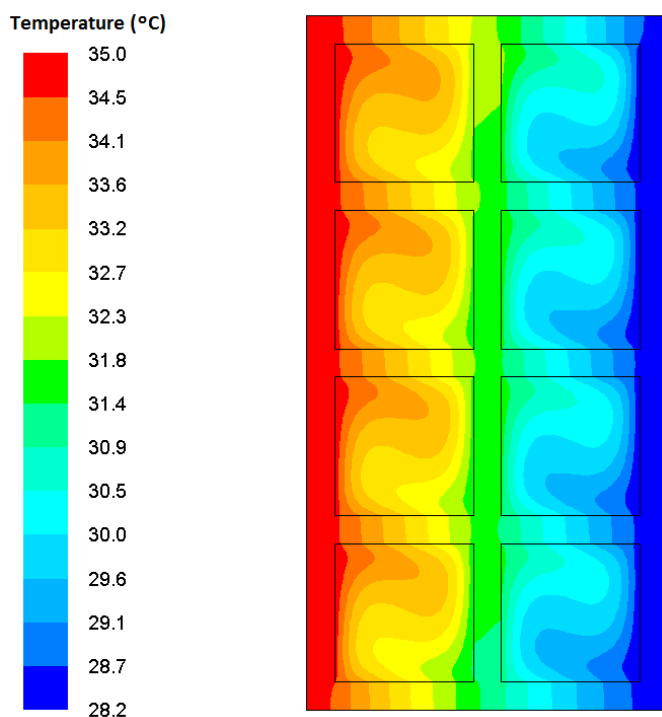


Figura 3.17 - Campo de temperaturas para o tijolo de 11 convencional, sem protuberâncias.

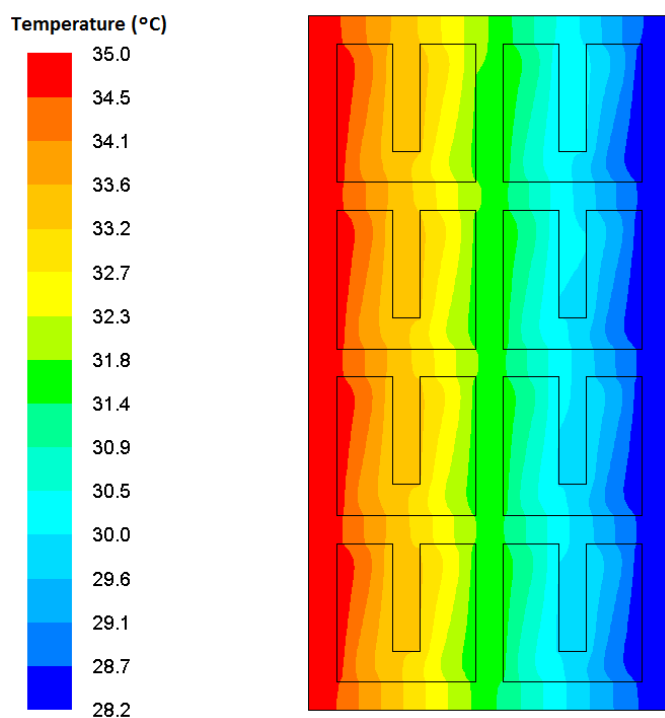


Figura 3.18 - Campo de temperaturas para o tijolo de 11 com as protuberâncias ótimas.

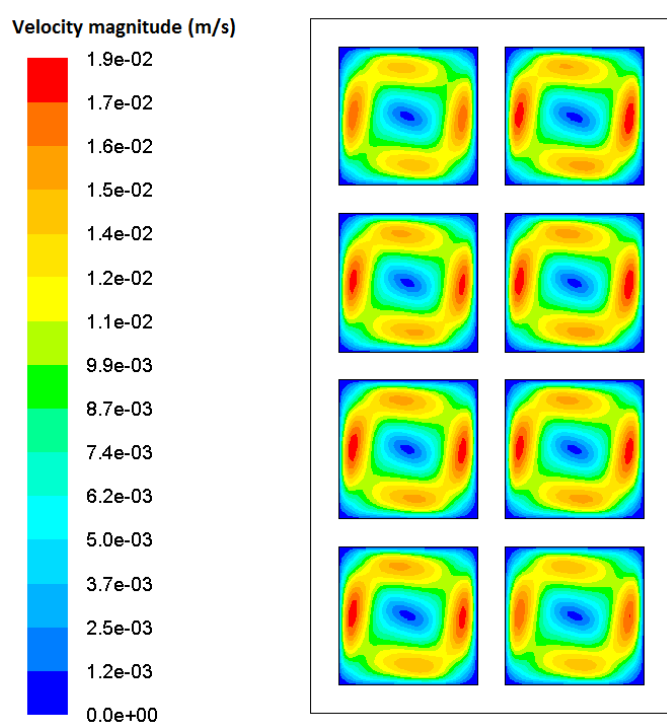


Figura 3.19 - Campo das magnitudes das velocidades para o tijolo de 11 convencional, sem protuberâncias.

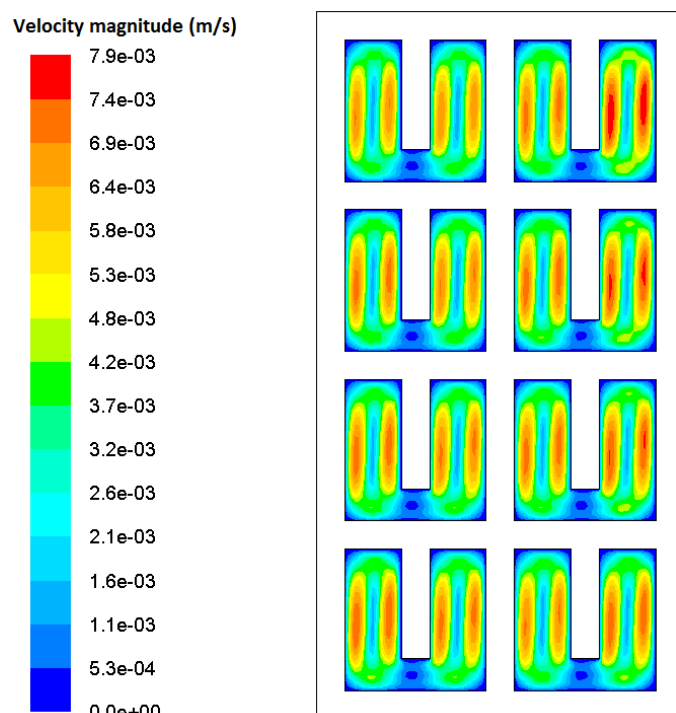


Figura 3.20 - Campo das magnitudes das velocidades para o tijolo de 11 com as protuberâncias ótimas.

### 3.2.2 Caso de estudo 2.2

A Figura 3.21 representa a vista da secção transversal de um tijolo de 15 com as protuberâncias colocadas no seu interior.

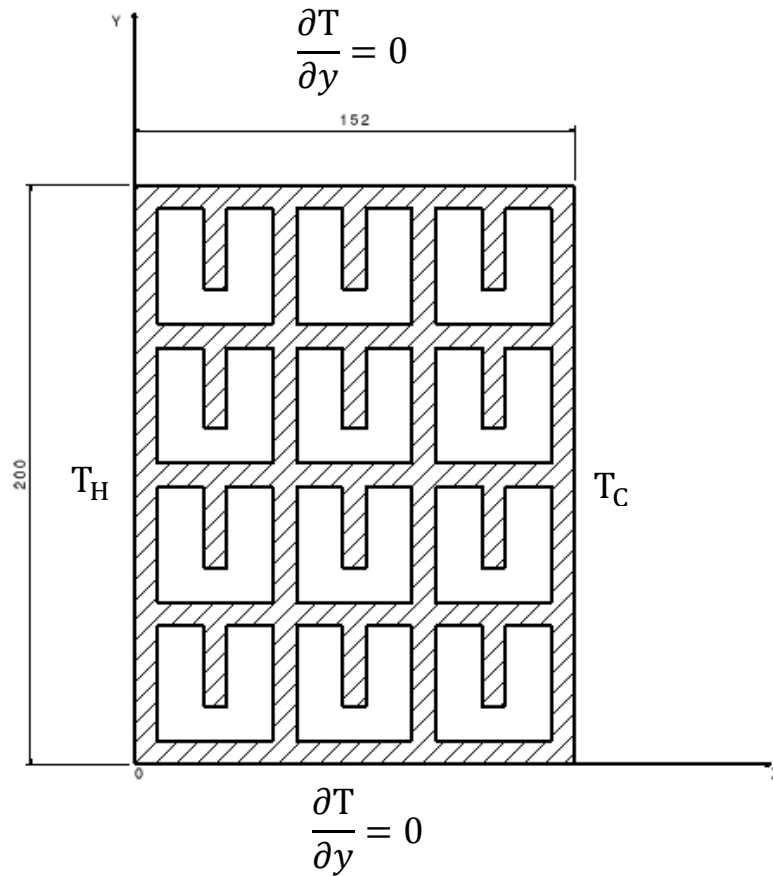


Figura 3.21 - Vista da secção transversal de um tijolo de 15 com protuberâncias ótimas (dimensões em mm).

#### Condições de fronteira

As condições de fronteira adotadas no programa de simulação numérica para resolver as equações referentes ao modelo físico-matemático do problema são:

$$x = 0 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad T_H = 35^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

$$x = 152 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad T_C = 24,8^\circ\text{C} \quad (3.7)$$

$$y = 0 \text{ mm}, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$y = 200 \text{ mm}, u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (3.9)$$

Pelas condições de fronteira apresentadas a diferença de temperaturas face a face é de  $10,2^\circ\text{C}$ , ou seja, três vezes maior que no caso de estudo 1, pois o tijolo tem três cavidades na direção do fluxo de calor, ou seja na direção X segundo a Figura 3.21. Assim, o número de Rayleigh para cada cavidade individual permanece essencialmente inalterado. A evolução gráfica dos resíduos obtidos encontra-se no anexo A, Figura A.3. Para a simulação numérica destes tijolos foram consideradas no total 10.000 iterações.

## Resultados

A Figura 3.22 representa o número de Nusselt em função da localização e do comprimento da protuberância para o intervalo descrito para o caso de estudo 2.1.

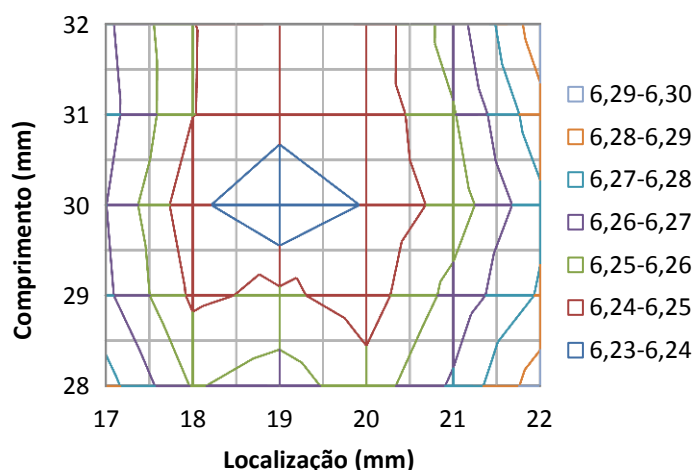


Figura 3.22 - Número de Nusselt em função da localização e do comprimento das protuberâncias para o tijolo de 15.

Segundo esta figura, as características relativas ao ponto ótimo correspondem às protuberâncias na localização **19 mm** e com o comprimento de **30 mm**, com um número de Nusselt associado de **6,23**, ao passo que o valor padrão do número de Nusselt é de 7,50.

Assim sendo, pela Equação (3.16) verifica-se que esta configuração corresponde a uma redução no número de Nusselt em cerca de **17%** comparativamente ao tijolo de 15 convencional.

Essa redução deve-se a um aumento da transferência de calor por condução proporcionado pelo efeito condutivo aumentado das protuberâncias evidenciado na Figura 3.24, pois tem uma distribuição de temperaturas mais uniforme e do tipo

condutivo que o tijolo de 15 convencional (Figura 3.23). Em contrapartida, esse aumento é mais que compensado pela inibição da convecção natural pelas protuberâncias, como mostra a Figura 3.26 na qual a ordem de grandeza da velocidade expressa pelas magnitudes das velocidades é menor face ao tijolo de 15 convencional (Figura 3.25), o que leva a uma diminuição da transferência de calor global.

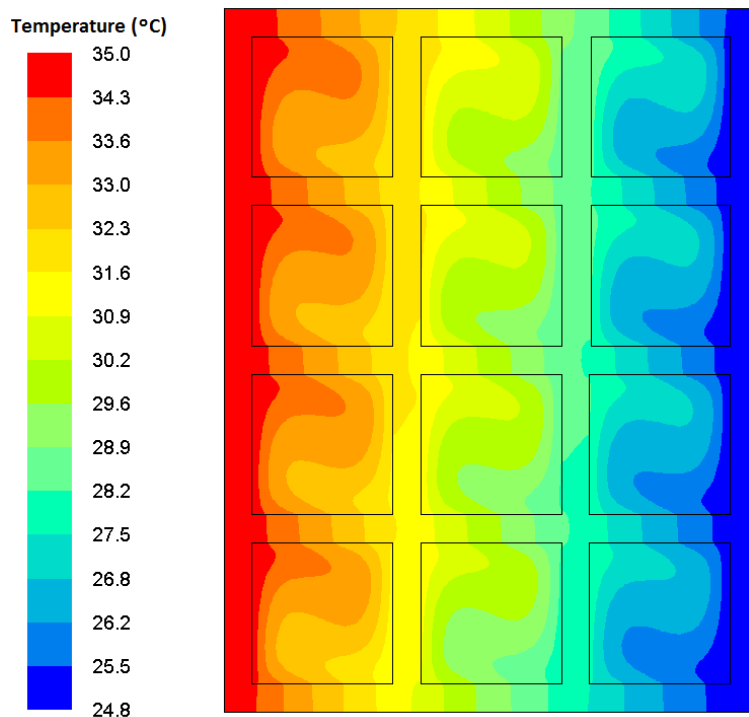


Figura 3.23 - Campo de temperaturas tijolo de 15 convencional, sem protuberâncias.

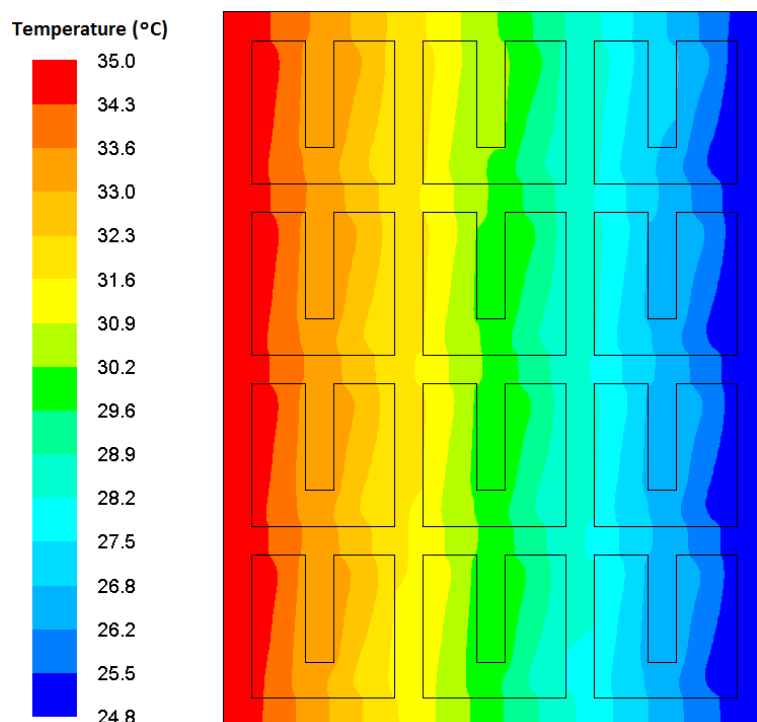


Figura 3.24 - Campo de temperaturas para o tijolo de 15 com as protuberâncias ótimas.

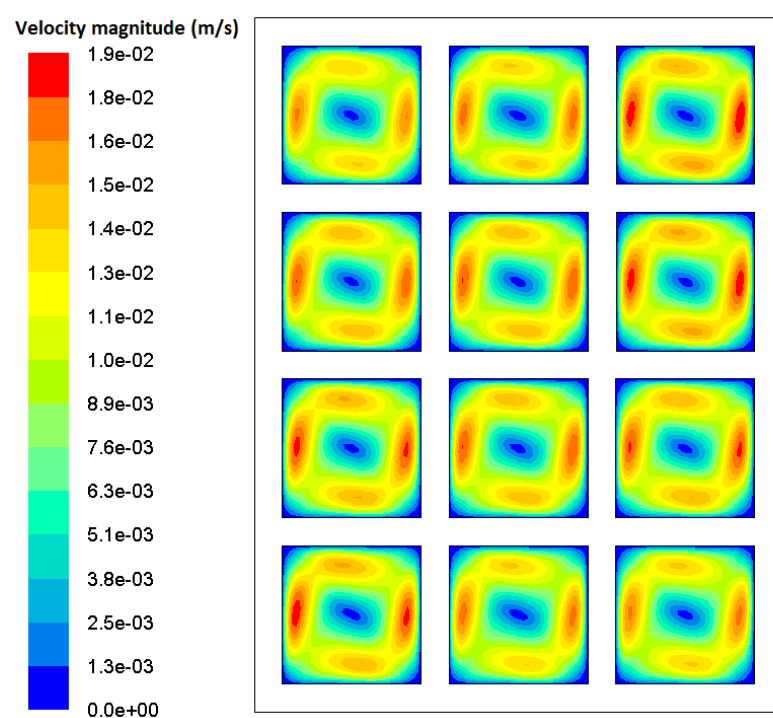


Figura 3.25 - Campo das magnitudes das velocidades para o tijolo de 15 convencional, sem protuberâncias.

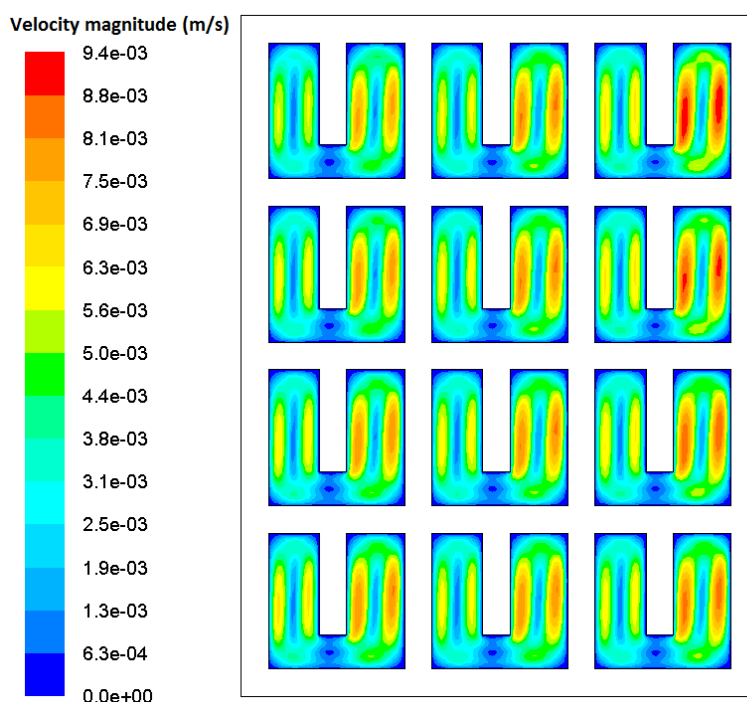


Figura 3.26 - Campo das magnitudes das velocidades para o tijolo de 15 com as protuberâncias ótimas.

Em síntese, a Tabela 3.2 indica os pontos ótimos correspondentes a cada caso de estudo, assim como as respectivas reduções no número de Nusselt.

Tabela 3.2 - Posição ótima da protuberância nos diferentes casos de estudo e redução conseguida na transferência de calor global.

	Localização [mm]	Comprimento [mm]	$\Delta T$ [°C]	Redução Nusselt (%)
Cavidade simples	20	30	3,4	12
Tijolo de 11	20	31	6,8	16
Tijolo de 15	19	30	10,2	17

Verifica-se assim que as reduções conseguidas na transferência de calor global são ainda maiores quando se consideram os tijolos completos que quando se considera uma única cavidade.

É de salientar que estas reduções no número de Nusselt são para as diferenças de temperatura acima indicadas, e no capítulo seguinte serão determinadas essas reduções para várias diferenças de temperatura entre as faces externa e interna dos tijolos.



## 4 Análise custo/benefício

Neste capítulo determina-se o impacto económico em termos de consumo energético e da aquisição dos tijolos com as características isolantes térmicas melhoradas. Numa primeira fase interessa saber quais as poupanças energéticas associadas aos novos tijolos, com protuberâncias, e posteriormente interessa saber quais os custos adicionais associados com a sua aquisição para assim avaliar a viabilidade e o retorno do investimento.

### 4.1 Poupanças energéticas potenciais dos novos tijolos

A diferença de temperatura utilizada para a determinação da posição ótima das protuberâncias nos tijolos de 11 e de 15 é de 6,8°C e 10,2°C, respetivamente. Deste modo interessa saber qual a redução em termos de transferência de calor global para as outras diferenças de temperatura passíveis de ocorrer na prática.

Assim, as Figuras 4.1 e 4.2 apresentam o número de Nusselt em função da diferença de temperatura para os tijolos de 11 e de 15, respetivamente, com e sem as protuberâncias, sendo que quando são consideradas as protuberâncias se trata das protuberâncias ótimas.

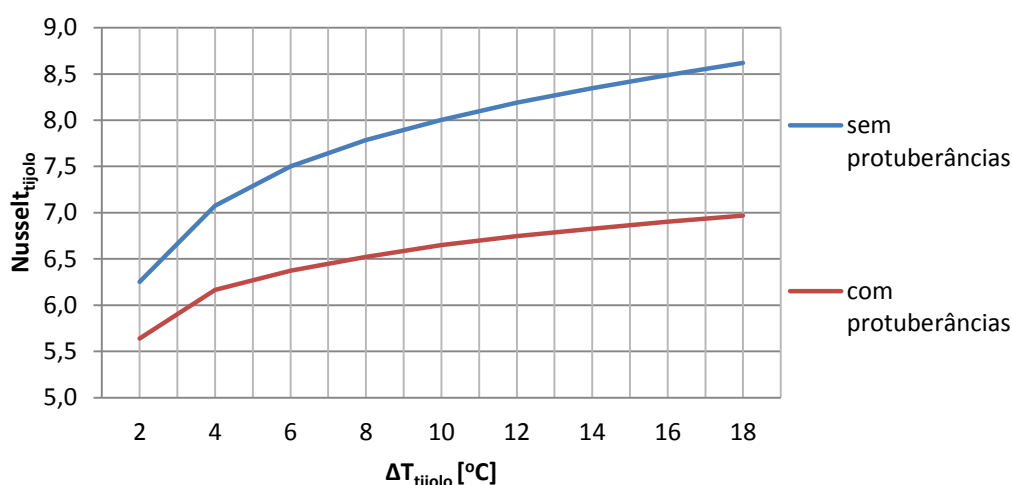
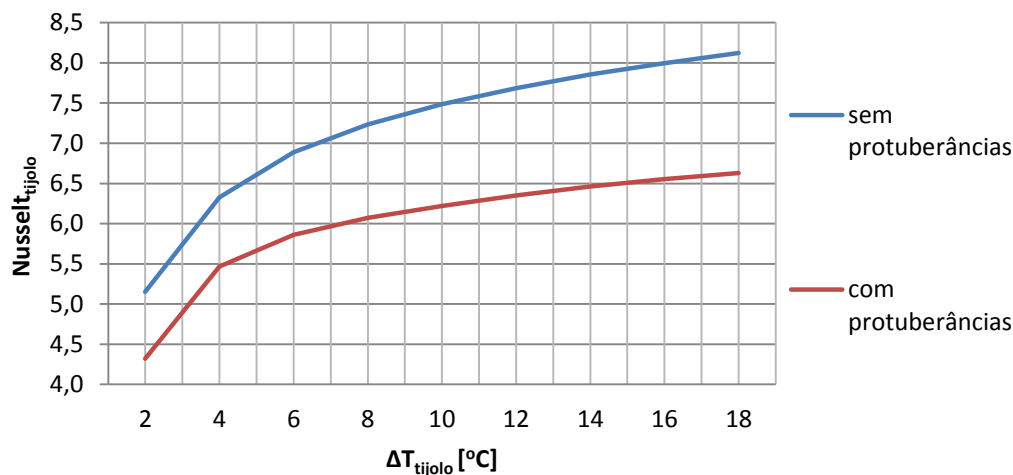


Figura 4.1 - Número de Nusselt em função da diferença de temperatura entre as faces do tijolo de 11, sem protuberâncias e com as protuberâncias ótimas.



**Figura 4.2 - Número de Nusselt em função da diferença de temperatura entre as faces do tijolo de 15, sem protuberâncias e com as protuberâncias ótimas.**

Para ambos os tijolos, verifica-se que quanto maior é a diferença de temperatura maior é a diferença entre número de Nusselt do caso do tijolo com e sem as protuberâncias, ou seja maior é o efeito inibidor das protuberâncias na transferência de calor global. No anexo B estão representadas as Tabelas B.1 e B.2 associadas aos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2.

Para determinar a diferença de temperaturas face a face para os tijolos num determinado local do país é necessário saber a sua diferença de temperaturas entre o exterior e o interior. Para isso é necessário saber o número de graus-dia associado, indicado no anexo III do RCCTE. A Equação (4.1) representa a fórmula para determinar o número de graus-dia, ou seja o grau de severidade de um clima durante a estação de aquecimento.

$$GD = \frac{\sum(T_i - T_a)^+}{24} \quad (4.1)$$

Como os graus-dia se determinam numa base de 20°C, logo é necessário dividir por 20 e pelo número de dias pertencentes à estação de aquecimento por forma a determinar a diferença de temperatura real positiva, ou seja a diferença de temperaturas entre os ambientes exterior e interior, como indica a Equação (4.2) (FEUP, 2005).

$$(T_i - T_a)^+ = \frac{\frac{GD \times 24}{20}}{\text{meses} \times 30} \quad (4.2)$$

Após determinar este valor, determina-se a diferença de temperaturas face a face nos tijolos através dos circuitos térmicos equivalentes para uma parede composta, estando o procedimento de cálculo descrito abaixo. Considera-se apenas uma parede simples de

alvenaria de forma a avaliar o impacto dos novos tijolos, e para além disso considera-se também a existência de 1 cm de reboco de cada lado das faces da parede, como indica a Figura 4.3, de modo a haver uma maior aproximação com a realidade.

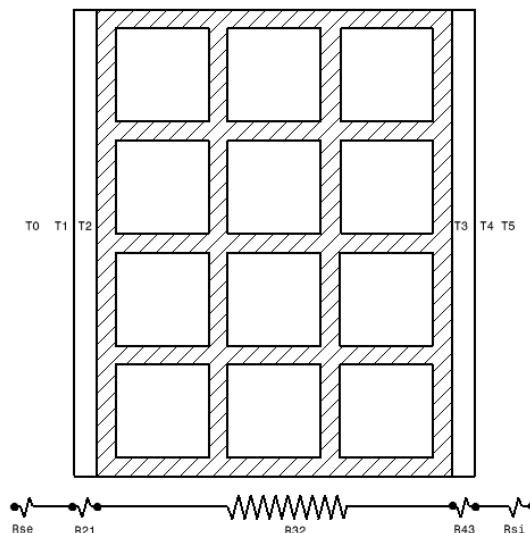


Figura 4.3 - Tijolo de 15 e reboco, e respetivo circuito térmico equivalente.

As Equações (4.3) a (4.5) fazem parte do procedimento de cálculo para determinação da diferença de temperatura  $T_3 - T_2$  (diferença de temperatura entre as faces do tijolo) (Incropera e Dewitt, 2005). Na Equação (4.3) contabiliza-se o valor do fluxo de calor que atravessa a parede.

$$\dot{Q}_{50}'' = \frac{T_5 - T_0}{R_{50}} \quad (4.3)$$

Na Equação (4.3a) determina-se o conjunto das resistências térmicas que compõem a parede.

$$R_{50} = R_{si} + R_{43} + R_{32} + R_{21} + R_{se} \quad (4.3a)$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W} \text{ ((LNEC), 2006)}$$

$$R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W} \text{ ((LNEC), 2006)}$$

As Equações (4.3.b) a (4.3.c) correspondem à resistência térmica de cada elemento que constitui a parede.

$$R_{21} = \frac{L_{rebext}}{k_{rebext}} \quad (4.3.b)$$

$$L_{rebext} = 0,01 \text{ m}$$

$$k_{rebext} = 1,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \text{ ((LNEC), 2006)}$$

$$R_{43} = \frac{L_{rebint}}{k_{rebint}} \quad (4.3.c)$$

$$L_{rebint} = L_{rebext}$$

$$k_{rebint} = k_{rebext}$$

$$R_{32} = \frac{L_{tijolo}}{Nu k_{ar}} \quad (4.3.d)$$

O  $L_{tijolo}$  corresponde ao valor da largura do tijolo já referido anteriormente na dissertação (0,104m para o tijolo de 11 e 0,152m para o tijolo de 15). Os números de Nusselt atribuídos nas Tabelas B.1 e B.2 do anexo B, associados aos tijolos de 11 e de 15 respetivamente, têm o valor correspondente à diferença de temperatura arbitrada  $T_3-T_2$ . Em condições de regime permanente, o fluxo de calor é o mesmo em todas as camadas da parede como refere a Equação (4.4).

$$\dot{Q}''_{50} = \dot{Q}''_{32} \quad (4.4)$$

Em seguida determina-se a diferença de temperaturas entre as superfícies 3 e 2 através da Equação (4.5).

$$T_3 - T_2 = \dot{Q}''_{32} R_{32} \quad (4.5)$$

Após isto, com os dados das Tabelas B.1 e B.2 do anexo B, faz-se a interpolação com o valor da diferença de temperatura  $T_3-T_2$ , de forma a obter o novo valor do número de Nusselt. Como este processo é iterativo, a partir daqui repete-se o procedimento descrito anteriormente até que a diferença de temperatura  $T_3-T_2$  deixe de variar. Para a determinação deste valor são necessárias apenas duas iterações.

Para o tijolo de 11, para uma diferença de temperatura entre o exterior e o interior ( $T_5-T_0$ ) compreendida entre 0 e 6°C, a diferença de temperatura face a face no tijolo ( $T_3-T_2$ ) é 1°C mais baixa, entre 6 e 10°C é 2°C mais baixa, entre 10 e 12°C é 3°C mais baixa, entre 12 e 16°C é 4°C mais baixa, e a partir de 18°C é de cerca de 5°C mais baixa.

Para o tijolo de 15, para uma diferença de temperatura entre o exterior e o interior compreendida entre 0 e 8°C, a diferença de temperatura face a face no tijolo é 1°C mais baixa, entre 10 e 12°C é 2°C mais baixa, e entre 14 e 18°C é 3°C mais baixa.

As Figuras 4.4 e 4.5 representam o número de Nusselt em função das diferenças de temperatura entre o exterior e o interior  $T_5-T_0$ , seja na estação de aquecimento (inverno), seja na estação de arrefecimento (verão).

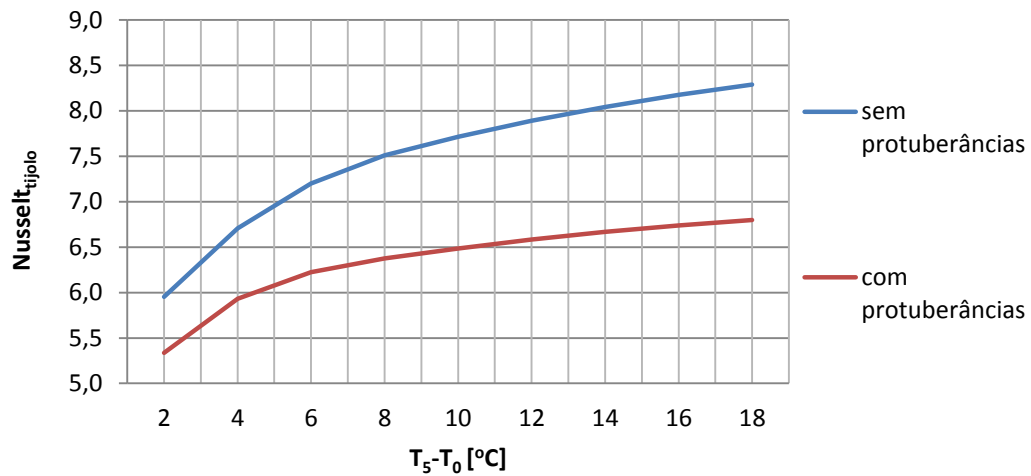


Figura 4.4 - Número de Nusselt em função da diferença de temperatura entre os ambientes exterior e interior para o tijolo de 11, sem protuberâncias e com as protuberâncias ótimas.

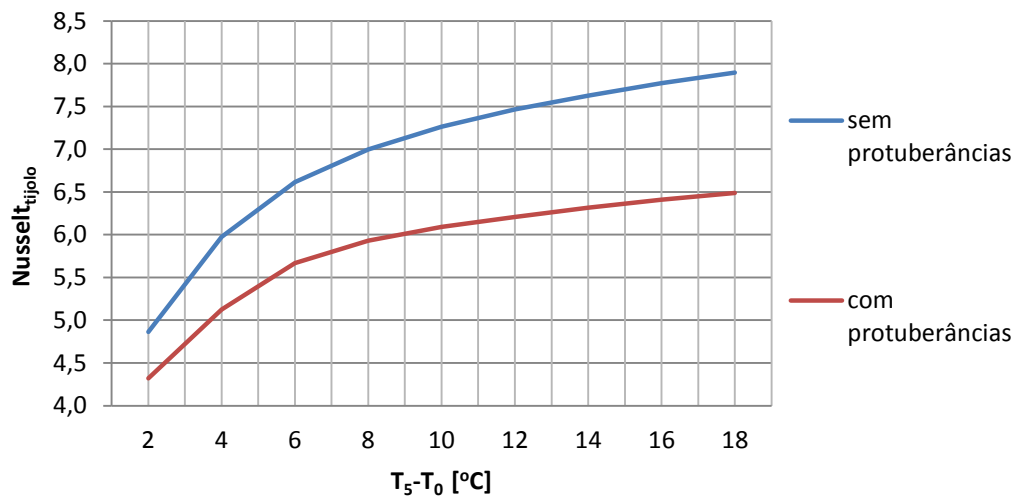
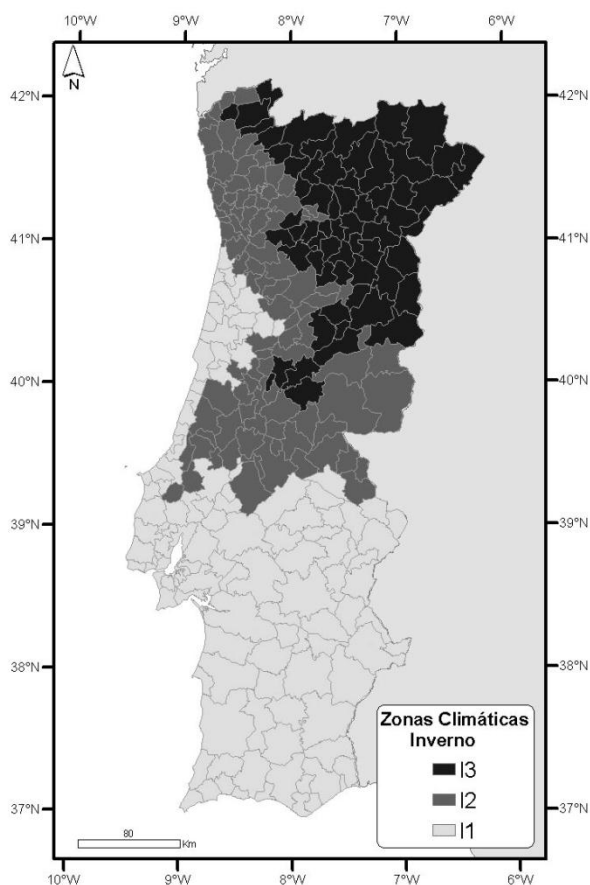


Figura 4.5 - Número de Nusselt em função da diferença de temperatura entre os ambientes exterior e interior para o tijolo de 15, sem protuberâncias e com as protuberâncias ótimas.

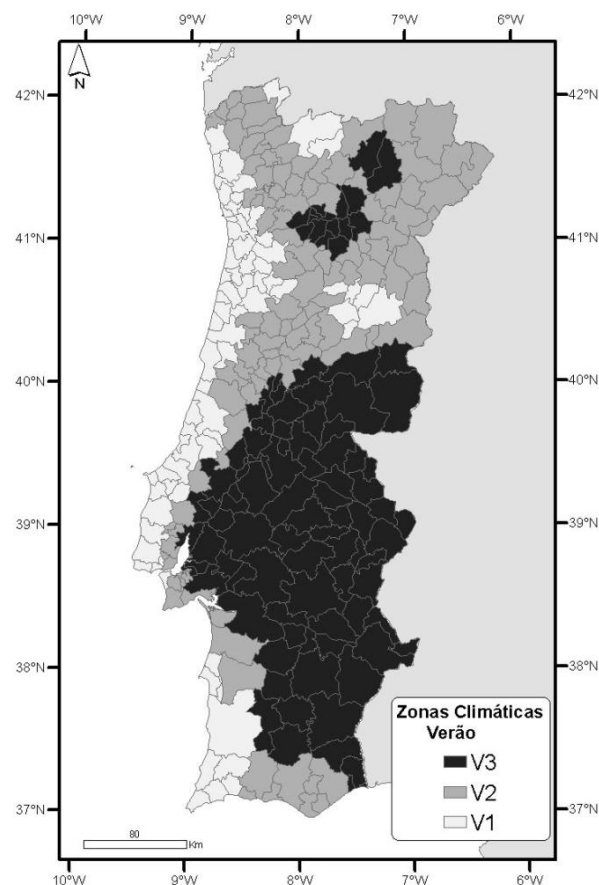
Nestas duas últimas figuras verifica-se o mesmo que nas Figuras 4.1 e 4.2, em que quanto maior é a diferença de temperatura entre os ambientes exterior e interior maior é a diferença no número de Nusselt do tijolo com e sem protuberâncias, e isto tanto no tijolo de 11 como no tijolo de 15.

#### 4.1.1 Caso prático

A título de exemplo, escolheram-se três locais distintos para fazer a análise custo/benefício por forma a avaliar a viabilidade de utilização dos novos tijolos com protuberâncias. Os locais escolhidos foram os concelhos de Évora, Bragança e Leiria. O motivo da escolha deve-se ao facto de existirem três zonas climáticas distintas tanto no inverno como no verão, ilustrados nas Figuras 4.6 e 4.7, respetivamente, e de pertencerem a zonas climáticas distintas tanto na estação de aquecimento (inverno) como de arrefecimento (verão).



**Figura 4.6 - Portugal continental. Zoneamento climático de inverno (DL 80/2006).**



**Figura 4.7 - Portugal continental. Zoneamento climático de verão (DL 80/2006).**

Posto isto, a Tabela 4.1 representa os resultados obtidos para estes locais para a diferença de temperatura entre os ambientes exterior e interior ( $T_5-T_0$ ) e para a diferença de temperaturas do tijolo face a face ( $T_3-T_2$ ) no tijolo de 11 ( $\Delta T_{T11}$ ) e no tijolo de 15 ( $\Delta T_{T15}$ ).

**Tabela 4.1 - Diferenças de temperatura entre os ambientes exterior e interior, e entre as faces dos tijolos.**

	Estação de aquecimento					Estação de arrefecimento			
	Zona climática inverno	Meses	(T <sub>5</sub> -T <sub>0</sub> ) [°C]	ΔT <sub>T15</sub> [°C]	ΔT <sub>T11</sub> [°C]	Zona climática verão	(T <sub>5</sub> -T <sub>0</sub> ) [°C]	ΔT <sub>T15</sub> [°C]	ΔT <sub>T11</sub> [°C]
Évora	I1	5,7	10	8	8	V3	10	8	8
Bragança	I3	8	14	11	10	V2	8	7	6
Leiria	I2	6	11	9	8	V1	6	5	5

Para determinar o calor necessário de forma a assegurar as condições de conforto no interior de um edifício, considerando uma parede simples de alvenaria, utiliza-se a Equação (4.6).

$$Q = Nu k_{ar} \frac{\Delta T_{tijolo}}{L_{tijolo}} A_s t \quad (4.6)$$

Os pressupostos utilizados para a utilização da equação anterior são os seguintes:

- A área superficial,  $A_s$ , corresponde a 3 m<sup>2</sup>, ou seja a 1 m linear de parede com 3 m de altura.
- As necessidades energéticas de um edifício dependem também da sua taxa de ocupação, a qual é considerada como sendo de 50%. Existem situações em que essa taxa é maior ou menor dependendo da divisão do edifício considerada e das rotinas dos seus utilizadores. Por forma a saber a taxa de ocupação para cada tipo de edifício poder-se-á recorrer ao anexo XV, “Padrões de Referência de Utilização dos Edifícios” do DL79/2006.

Os resultados associados ao consumo de energia estão no anexo B, nas Tabelas B.4, B.5 e B.6. Para saber o custo associado à energia basta utilizar a Equação (4.7).

$$Custo = Q \left( \frac{Preço}{kWh} \right) \quad (4.7)$$

Os pressupostos utilizados para a determinação do custo associado à energia são os seguintes:

- A fonte de energia é a eletricidade, pois existe um valor de referência e é a fonte de energia mais convencional, ao contrário de outras como gás natural, gasóleo e biomassa.
- O preço do kWh considerado de acordo com a tarifa simples é de 0,1393 €/kWh (EDP, 2012).
- O custo da taxa de disponibilidade não entra nos cálculos, pois é essencialmente o mesmo com os tijolos comuns ou com os novos tijolos, com protuberâncias.

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 mostram os custos associados com a energia para as diversas situações.

**Tabela 4.2 - Custos associados à energia consumida na estação de aquecimento (inverno).**

Estação de Aquecimento	Tijolo de 15				Tijolo de 11			
	Custo c/ tijolo comum (€/m)	Custo c/ novo tijolo (€/m)	$\Delta$ Custo (€/m)	% Poupança	Custo c/ tijolo comum (€/m)	Custo c/ novo tijolo (€/m)	$\Delta$ Custo (€/m)	% Poupança
Évora	8,17	6,85	1,32	16,2	11,55	9,71	1,84	15,9
Bragança	16,70	13,83	2,87	17,2	23,42	19,42	4,00	17,1
Leiria	9,57	7,99	1,58	16,5	13,50	11,30	2,20	16,3

**Tabela 4.3 - Custos associados à energia consumida na estação de arrefecimento (verão).**

Estação de Arrefecimento	Tijolo de 15				Tijolo de 11			
	Custo c/ tijolo comum (€/m)	Custo c/ novo tijolo (€/m)	$\Delta$ Custo (€/m)	% Poupança	Custo c/ tijolo comum (€/m)	Custo c/ novo tijolo (€/m)	$\Delta$ Custo (€/m)	% Poupança
Évora	5,73	4,81	0,93	16,2	8,11	6,82	1,29	15,9
Bragança	4,45	3,77	0,68	15,3	6,36	5,40	0,96	15,1
Leiria	3,18	2,73	0,45	14,2	4,62	3,99	0,63	13,5

**Tabela 4.4 - Custos anuais associados à energia consumida (ambas as estações).**

Total Anual	Tijolo de 15				Tijolo de 11			
	Custo c/ tijolo comum (€/m)	Custo c/ novo tijolo (€/m)	$\Delta$ Custo (€/m)	% Poupança	Custo c/ tijolo comum (€/m)	Custo c/ novo tijolo (€/m)	$\Delta$ Custo (€/m)	% Poupança
Évora	13,90	11,65	2,25	16,2	19,66	16,53	3,13	15,9
Bragança	21,15	17,60	3,55	16,8	29,77	24,82	4,96	16,7
Leiria	12,75	10,72	2,03	15,9	18,12	15,29	2,83	15,6

A diferença no consumo de energia entre o tijolo de 11 é maior que no tijolo de 15 por causa da espessura do tijolo de 11 ser menor que a do tijolo de 15. Os restantes parâmetros são praticamente iguais, incluindo a diferença no número de Nusselt entre o tijolo padrão e o novo tijolo, bem como a diferença de temperatura entre as faces opostas do tijolo. As poupanças energéticas para as restantes diferenças de temperatura estão no anexo B, Tabela B.3.



## 4.2 Custo dos novos tijolos

Nesta secção determina-se o custo de aquisição dos novos tijolos, sendo que estes envolvem duas componentes que são os custos de fabrico e os custos de transporte adicionais. O custo de fabrico adicional em relação aos tijolos padrão é proporcional à massa total de todas as protuberâncias dos novos tijolos, como indica a Tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Custos de fabrico associados aos novos tijolos, com protuberâncias.**

	Fabrico						
	Tijolo comum			Novo tijolo			Custo adicional (%)
	Massa (kg)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Preço (c€)	Massa (kg)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Preço (c€)	
Tijolo de 11	4,0	2.400	10	5	2.995	12,48	25
Tijolo de 15	5,6	3.360	14	7	4.224	17,6	26

É de assinalar também que o processo de fabrico dos novos tijolos é o mesmo, ou seja, por extrusão, apenas sendo mudada a fieira para a protuberância ser extrudida juntamente com a cavidade. As protuberâncias no final ficam com um pequeno empeno nos topos mas irão à mesma inibir a convecção natural.

O custo de transporte adicional corresponde ao número de novos tijolos a menos que é possível transportar em relação aos tijolos padrão, pois a carga útil de um camião é de 25 toneladas, e é o indicado na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6 - Custos de transporte associados aos novos tijolos, com protuberâncias.**

	Transporte		
	Número de tijolos padrão	Número de novos tijolos	Custo adicional (%)
Tijolo de 11	6250	5008	25
Tijolo de 15	4464	3551	26

Assim, o preço final do tijolo de 11 é de **12,48 c€**, o que representa um custo adicional de **25%** face ao preço do tijolo de 11 padrão, enquanto que o do tijolo de 15 é de **17,6 c€**, que equivale a um custo adicional de **26%**. É de salvaguardar que todos os custos apresentados estão isentos de IVA.

Posto isto, pode-se agora determinar o custo associado a uma parede simples de alvenaria com um metro linear e com três metros de altura, ou seja três metros quadrados. Um metro linear de parede é constituído por 50 tijolos, seja de tijolo de 11 ou de tijolo de 15. A Tabela 4.7 representa os custos de uma parede simples de alvenaria.

**Tabela 4.7 - Custo por metro linear de uma parede simples de alvenaria.**

	Preço por metro linear (tijolo comum) (€)	Preço por metro linear (novo tijolo) (€)	Preço adicional por metro linear (€)	Custo adicional (%)
Tijolo de 11	5,00	6,24	1,24	25
Tijolo de 15	7,00	8,80	1,80	26

Apesar do preço dos tijolos ser mais elevado com a utilização dos novos tijolos, o consumo de energia necessário para manter as condições de conforto no interior de um edifício é menor como já foi visto anteriormente.

### 4.3 Retorno de investimento nos novos tijolos

Nesta secção determina-se o retorno de investimento com a utilização dos novos tijolos nos locais anteriormente referenciados. As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 representam graficamente o custo energético mais o custo de aquisição dos tijolos de 15 em função do tempo, em anos, para Évora, Bragança e Leiria, respetivamente. Já as Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 correspondem aos tijolos de 11 para as mesmas localidades, respetivamente.

As setas a preto indicam o tempo de retorno total, a vermelho o tempo de retorno para a estação de aquecimento e a azul o tempo de retorno para a estação de arrefecimento.

Tanto para o tijolo de 11 como para o tijolo de 15, o local onde o tempo de retorno do investimento é maior é em Leiria, pois esta região tem invernos menos rigorosos que Bragança e tem um verão mais ameno; em contrapartida, Bragança é o local onde o tempo de retorno de investimento é menor, pois a região tem invernos mais rigorosos e verões relativamente quentes. A região de Évora tem a particularidade de ter o tempo de retorno do investimento mais baixo para a estação de arrefecimento, visto ser a região que tem os verões mais quentes.

O tijolo de 11 tem tempos de retorno inferiores ao tijolo de 15, pois a diferença nos consumos energéticos e o custo de aquisição também é menor, sendo globalmente o tempo de retorno de investimento menor para este tipo de tijolos.

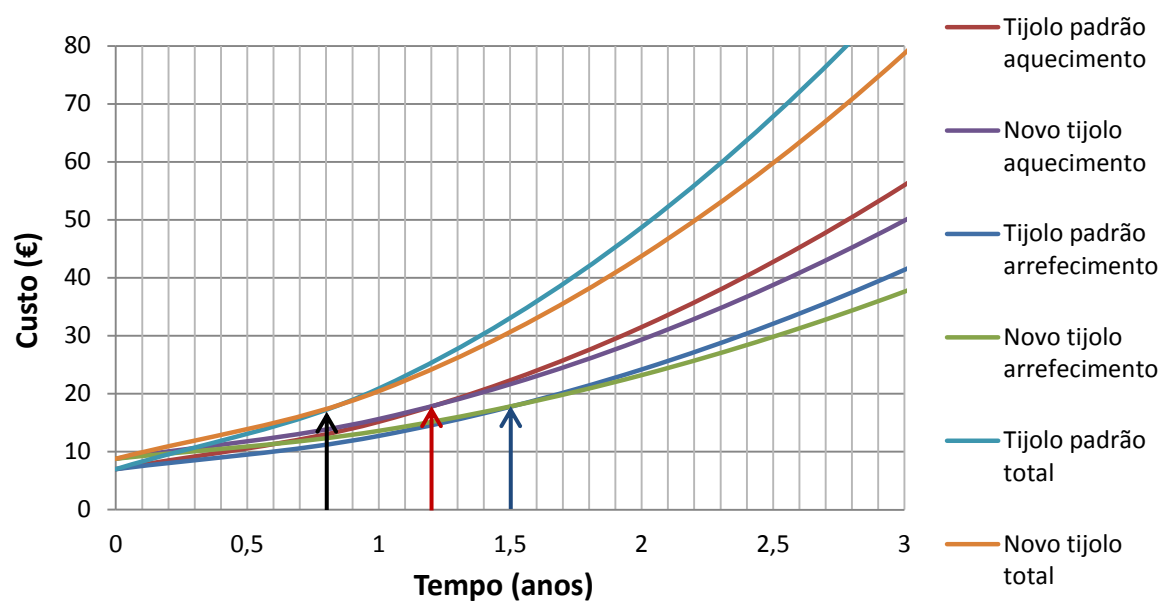


Figura 4.8 - Representação gráfica do custo/benefício dos novos tijolos de 15 para o concelho de Évora.

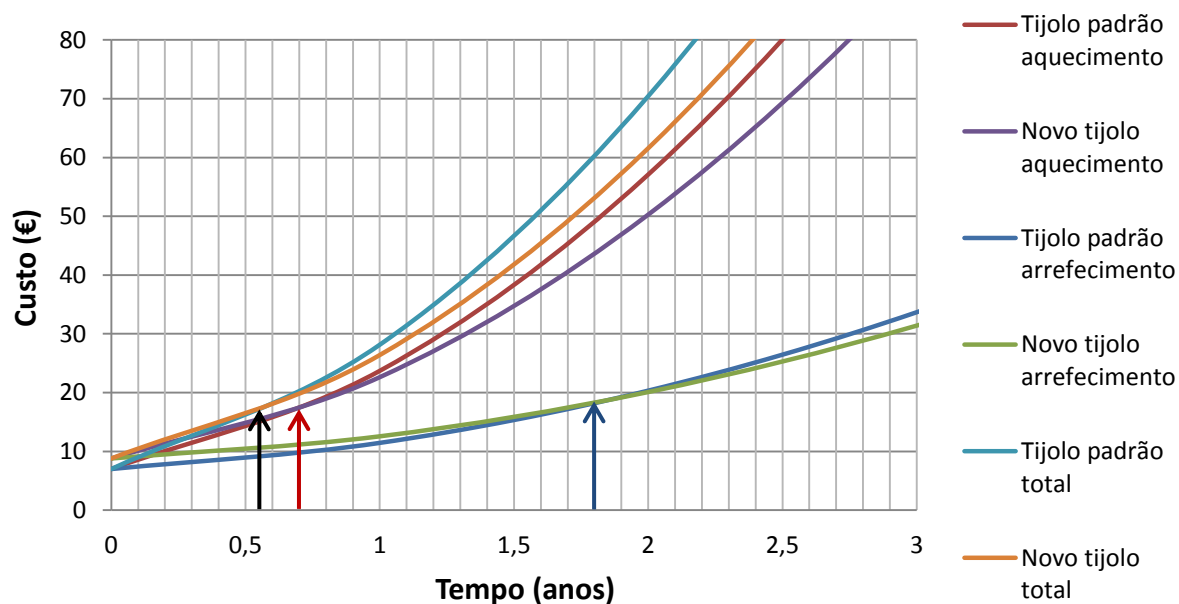


Figura 4.9 - Representação gráfica do custo/benefício dos novos tijolos de 15 para o concelho de Bragança.

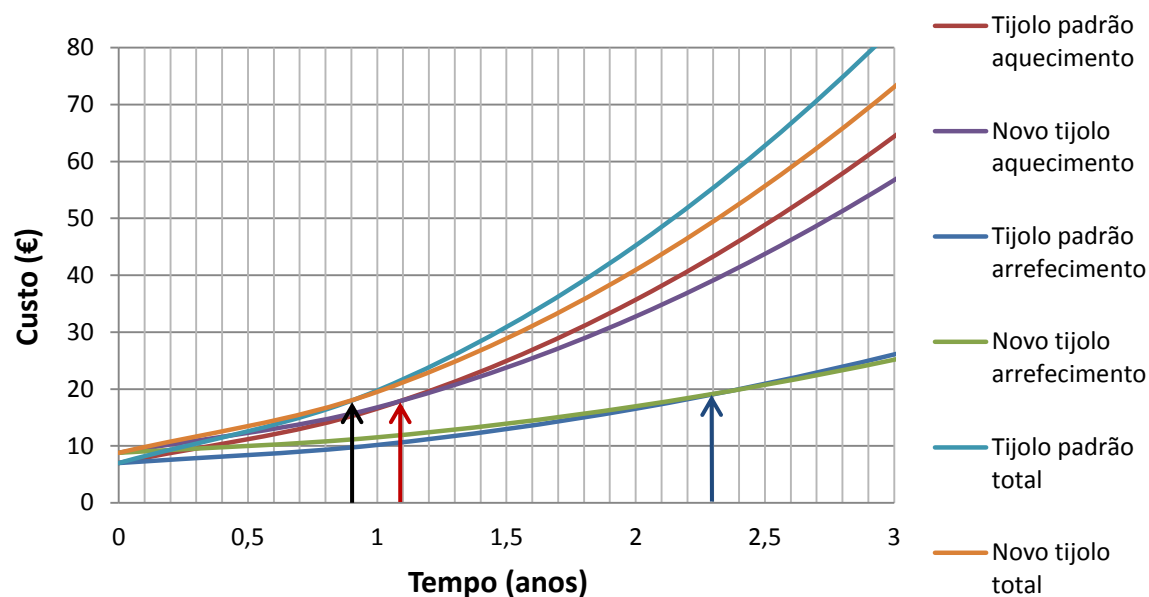


Figura 4.10 - Representação gráfica do custo/benefício dos novos tijolos de 15 para o concelho de Leiria.

Na figura anterior o tempo de retorno de investimento para a estação de arrefecimento é de três anos e três meses.

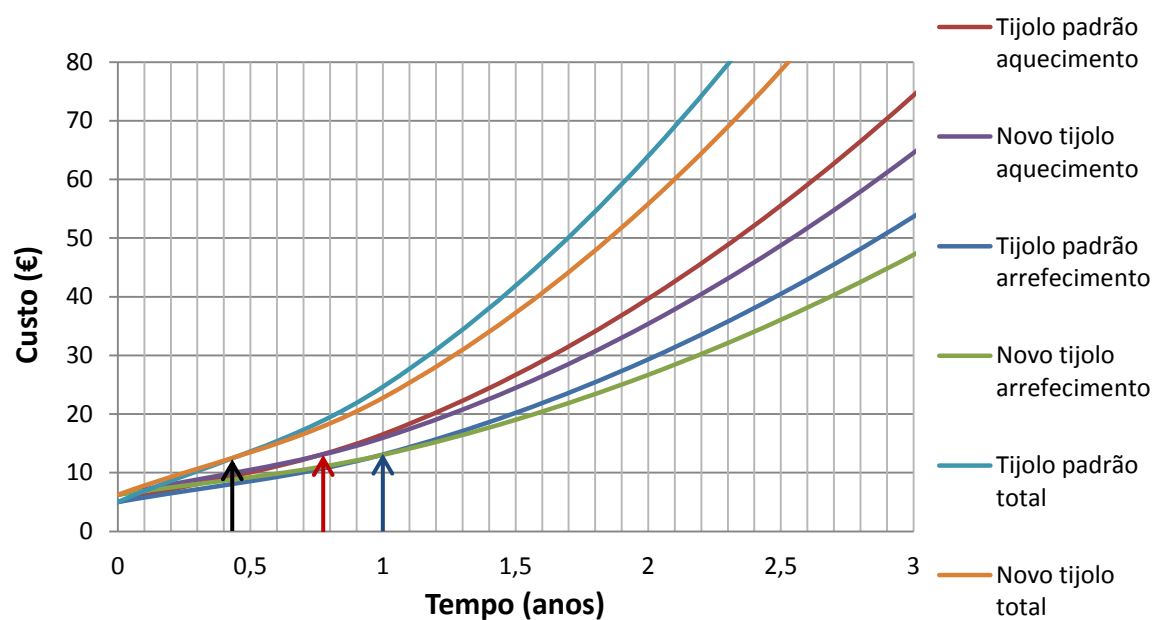


Figura 4.11 - Representação gráfica do custo/benefício dos novos tijolos 11 para o concelho de Évora.

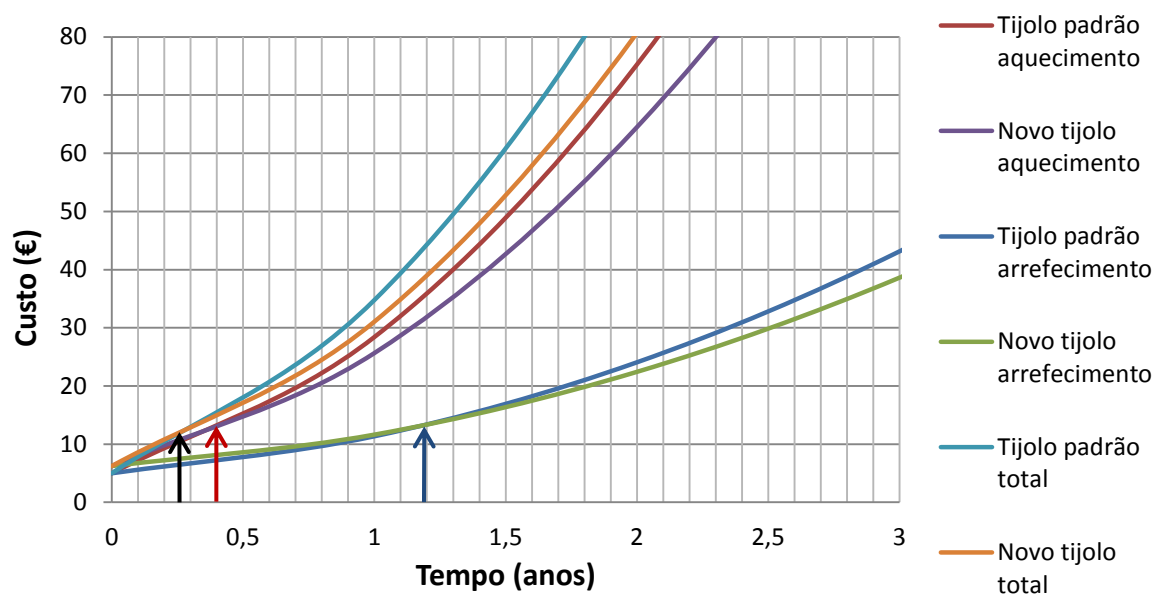


Figura 4.12 - Representação gráfica do custo/benefício dos novos tijolos 11 para o concelho de Bragança.

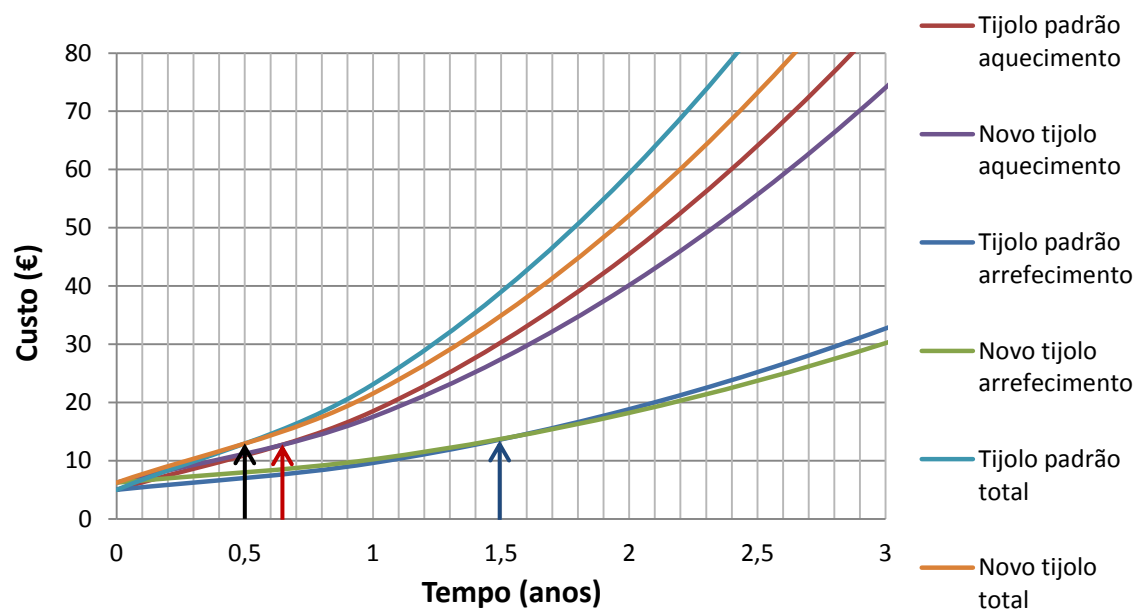


Figura 4.13 - Representação gráfica do custo/benefício dos novos tijolos 11 para o concelho de Leiria.



## 5 Conclusões

Com esta dissertação conclui-se que as cavidades com duas protuberâncias têm uma performance térmica inferior às cavidades com uma única protuberância. Em suma, a configuração da cavidade de tijolo conducente à menor transferência de calor global corresponde a uma única protuberância por cavidade posicionada na localização **20 mm** e com o comprimento de **30 mm**. Em relação às cavidades do tijolo de 11 completo, a configuração destas corresponde a uma protuberância posicionada na localização **20 mm** e com o comprimento de **31 mm**. Já para o tijolo de 15 completo as protuberâncias ótimas estão na localização **19 mm** e com o comprimento de **30 mm**.

Como a protuberância está posicionada sensivelmente a meio no interior das cavidades o tijolo é fácil de manusear pelo assentador, e isto faz com que independentemente da face que fique colocada do lado exterior o isolamento térmico proporcionado pelos tijolos com protuberâncias é praticamente o mesmo. O tijolo pode ser colocado tanto com a protuberância fixa à superfície superior como à inferior, pois o efeito de isolamento térmico é praticamente o mesmo.

Nos tijolos de 11 e de 15 as poupanças energéticas são de **16%** e de **17%**, respetivamente, para as condições em que foram feitas as simulações. No entanto, essas poupanças podem ser maiores caso a diferença de temperatura entre as faces exterior e interior dos tijolos seja maior, pois o efeito benéfico de inibição da convecção natural pelas protuberâncias é tanto mais notório quanto maior a diferença de temperatura entre as faces opostas dos tijolos.

O tijolo de 11 é o mais vendido, pois é o mais barato; além disso, pela análise custo/benefício verifica-se que o retorno de investimento na aquisição dos novos tijolos 11 é também mais baixo face aos novos tijolos de 15. Como era de esperar, o tempo de retorno de investimento associado aos novos tijolos é mais baixo na região de Bragança; em oposição, a região de Leiria é a que tem um tempo de retorno do investimento maior de entre as regiões analisadas.

Quanto a trabalhos futuros, a mesma metodologia utilizada para determinar a solução que corresponde à melhor performance de isolamento térmico dos tijolos pode ser aplicada para qualquer sistema térmico que possua cavidades, em que seja necessário minimizar o efeito da convecção natural por inibição do escoamento que lhe está associado.





## Anexos

### Anexo A - Evolução dos resíduos nas simulações numéricas.

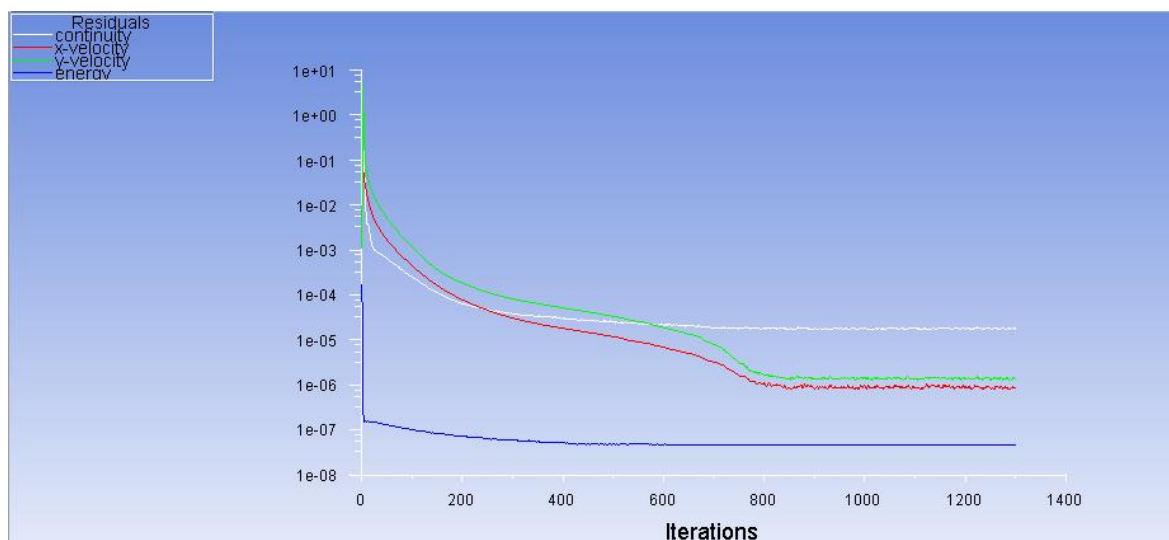


Figura A.1 - Evolução dos resíduos da simulação de uma cavidade individual de um tijolo.

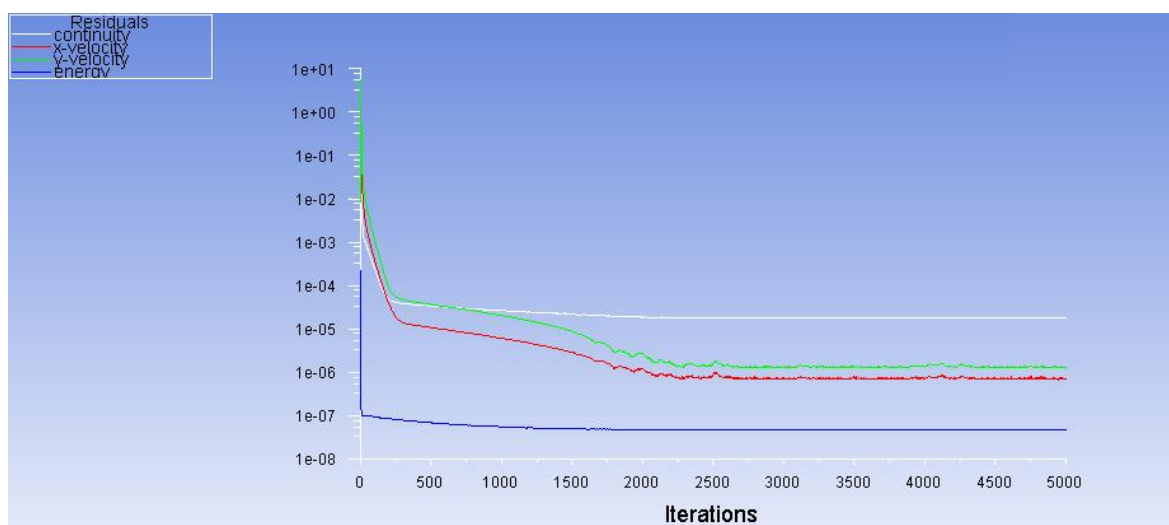


Figura A.2 - Evolução dos resíduos da simulação do tijolo de 11 com protuberâncias.

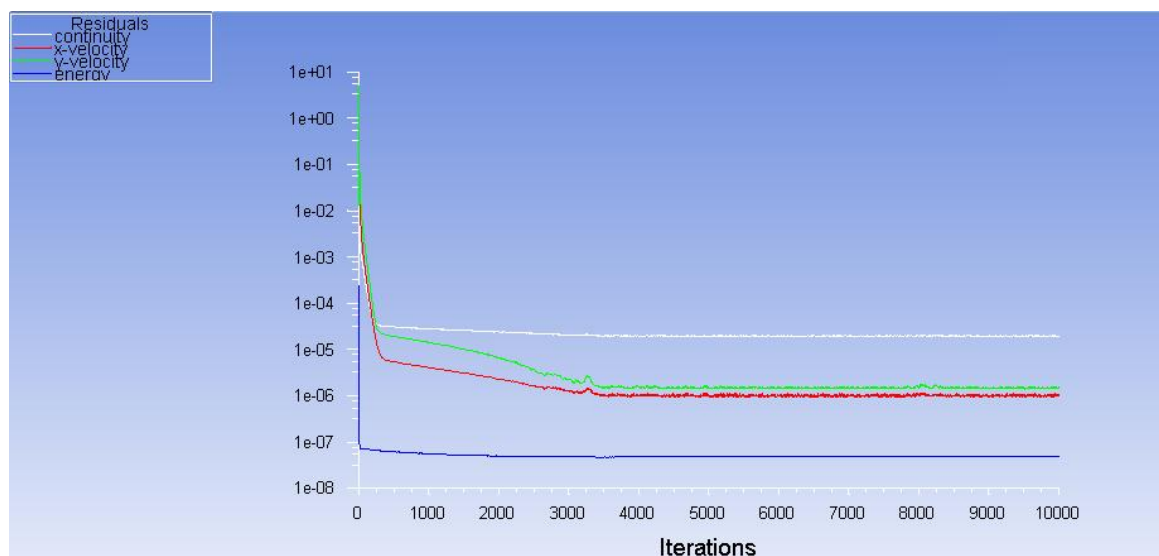


Figura A.3 - Evolução dos resíduos da simulação do tijolo de 15 com protuberâncias.

## Anexo B - Ganhos energéticos com os novos tijolos.

**Tabela B.1 - Valores do calor transferido e do número de Nusselt para os tijolos comuns e para os novos tijolos de 11.**

$\Delta T_{\text{tijolo}} [^{\circ}\text{C}]$	Comuns		Novos		Poupança (%)
	$\dot{Q} [\text{W}]$	Nu	$\dot{Q} [\text{W}]$	Nu	
2	0,58	6,25	0,52	5,64	9,8
4	1,32	7,08	1,15	6,17	12,9
6	2,09	7,50	1,78	6,37	15,1
8	2,90	7,79	2,43	6,52	16,2
10	3,72	8,00	3,09	6,65	16,9
12	4,57	8,19	3,77	6,75	17,6
14	5,44	8,35	4,45	6,83	18,2
16	6,32	8,49	5,14	6,90	18,7
18	7,22	8,62	5,84	6,97	19,2

**Tabela B.2 - Valores do calor transferido e do número de Nusselt para os tijolos comuns e para os novos tijolos de 15.**

$\Delta T_{\text{tijolo}} [^{\circ}\text{C}]$	Comuns		Novos		Poupança (%)
	$\dot{Q} [\text{W}]$	Nu	$\dot{Q} [\text{W}]$	Nu	
2	0,33	5,15	0,28	4,32	16,1
4	0,81	6,33	0,70	5,47	13,6
6	1,32	6,89	1,12	5,86	14,9
8	1,84	7,24	1,55	6,07	16,1
10	2,38	7,48	1,98	6,22	16,9
12	2,94	7,68	2,43	6,35	17,3
14	3,50	7,85	2,88	6,46	17,7
16	4,07	8,00	3,34	6,55	18,1
18	4,66	8,12	3,80	6,63	18,4

**Tabela B.3 - Poupanças energéticas para as várias diferenças de temperatura**

$(T_5 - T_0)$ [°C]	$\Delta T_{T11}$ [°C]	$\Delta T_{T15}$ [°C]	Poupança (%)	
			Tijolo de 11	Tijolo de 15
2	2	2	10,3	11,1
4	3	3	11,6	14,3
6	5	5	13,5	14,3
8	6	7	15,1	15,3
10	8	8	15,9	16,2
12	9	10	16,6	16,8
14	10	11	17,1	17,2
16	12	13	17,6	17,5
18	13	15	18,0	17,8

**Tabela B.4 - Energia consumida na estação de aquecimento (inverno).**

Estação de aquecimento	Tijolo de 15				Tijolo de 11			
	Cons. c/ tijolo comum (kWh)	Cons. c/ novo tijolo (kWh)	$\Delta$ Cons. (kWh)	% Poup.	Cons. c/ tijolo comum (kWh)	Cons. c/ novo tijolo (kWh)	$\Delta$ Cons. (kWh)	% Poup.
Évora	59	49	9	16,2	83	70	13	15,9
Bragança	120	99	21	17,2	168	139	29	17,1
Leiria	69	57	11	16,5	97	81	16	16,3

**Tabela B.5 - Energia consumida na estação de arrefecimento (verão).**

Estação de arrefecimento	Tijolo de 15				Tijolo de 11			
	Cons. c/ tijolo comum (kWh)	Cons. c/ novo tijolo (kWh)	$\Delta$ Cons. (kWh)	% Poup.	Cons. c/ tijolo comum (kWh)	Cons. c/ novo tijolo (kWh)	$\Delta$ Cons. (kWh)	% Poup.
Évora	41	34	7	16,2	58	49	9	15,9
Bragança	32	27	5	15,3	46	39	7	15,1
Leiria	23	20	3	14,2	33	29	4	13,5

**Tabela B.6 - Total anual de energia consumida (ambas as estações).**

Total anual	Tijolo de 15				Tijolo de 11			
	Cons. c/ tijolo comum (kWh)	Cons. c/ novo tijolo (kWh)	$\Delta$ Cons. (kWh)	% Poup.	Cons. c/ tijolo comum (kWh)	Cons. c/ novo tijolo (kWh)	$\Delta$ Cons. (kWh)	% Poup.
Évora	100	84	16	16,2	141	119	22	15,9
Bragança	152	126	26	16,8	214	178	36	16,7
Leiria	92	77	15	15,9	130	110	20	15,6



## Bibliografia

DGGE- Direcção-Geral de Energia e Geologia. 2012. [Consult. 11-01-2012]. Disponível em <http://www.dgge.pt>

Incropera, P. e Dewitt P. - Fundamentals of heat and mass transfer. 2006.

DL 80/2006- Decreto-Lei nº80/2006. ISBN/ISSN 67 (2006-04-04).

Li, L.P.; Wu, Z.G.; Li, Z.Y.; He, Y.L.; Tao, W.Q. - Numerical thermal optimization of the configuration of multi-holed clay bricks used for constructing building walls by the finite volume method. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 51, n.º 13-14 (2008b), p. 3669-3682.

Li, L.P.; Wu, Z.G.; He, Y.L.; Lauriat, G.; Tao, W.Q. - Optimization of the configuration of 290 × 140 × 90 hollow clay bricks with 3-D numerical simulation by finite volume method. Energy and Buildings. Vol. 40, n.º 10 (2008a), p. 1790-1798.

Sun, J.; Fang, L. - Numerical simulation of concrete hollow bricks by the finite volume method. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 52, n.º 23-24 (2009), p. 5598-5607.

Boukendil, M.; Abdelbaki, A.; Zrikem, Z. - Numerical simulation by the FVM of coupled heat transfers by conduction, natural convection and radiation in honeycomb's hollow bricks. Building Simulation. ISSN 1996-3599. Vol. 2, n.º 4 (2009), p. 263-272.

Morales, M. P.; Juárez, M.C.; López-Ochoa, L.M.; Doménech, J. - Study of the geometry of a voided clay brick using rectangular perforations to optimize its thermal properties. Applied Thermal Engineering. Vol. 31, n.º 11-12 (2011), p. 2063-2065.

Arendt, K.; Krzaczek, M.; Florczuk, J. - Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration. International Journal of Thermal Sciences. Vol. 50, n.º 8 (2011), p. 1543-1553.

Al-Hazmy, M. M. - Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks. Energy and Buildings. Vol. 38, n.º 5 (2006), p. 515-521.

Al-Hazmy, M. M. - Numerical investigation on using inclined partitions to reduce natural convection inside the cavities of hollow bricks. International Journal of Thermal Sciences. Vol. 49, n.º 11 (2010), p. 2201-2210.

CONSTRUCER, CERÂMICA DE CONSTRUÇÃO, S.A - Construcer [Consult. 11-02-2012]. Disponível em <http://www.construcer.com/>.

Incropera, P. e Dewitt P. - Fundamentos de transferência de calor 5ª edição 2005.

ANSYS, INC - ANSYS FLUENT Theory Guide USA, 2010. [Consult. 03-04-2012]. Disponível na internet: <http://www.ansys.com>.

FLUENT, INCORPORATED - FLUENT 6.3 User's guide. USA, 2006. [Consult. 26-01-2013]. Disponível na internet: <http://www.ansys.com>.

Gaspar, P.D.; Pitarma, R.A. - Esquemas de discretização em escoamentos com regimes de convecção mista. 2003.

V. A. F. Costa - Otimização do desempenho de tijolos perfurados de barro vermelho como elementos isolantes térmicos das paredes de edifícios. Atas da *MEFTE 2012 – IV Conferência Nacional de Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia* (trabalho 29), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa (Portugal), 28 e 29 de Maio de 2012.

FEUP - Método graus-dia. 2005. [Consult. 05-03-2012]. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt>.

(LNEC), LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL- ITE 50. 2006.

EDP - Tarifário edp casa . 2012 [Consult. 01-03-2012]. Disponível em <http://www.edp.pt>.